



TITLE:

中性子吸収材エルビアを用いた濃縮度5wt%を超える原子炉用燃料の実現に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

山崎, 正俊

CITATION:

山崎, 正俊. 中性子吸収材エルビアを用いた濃縮度5wt%を超える原子炉用燃料の実現に関する研究. 京都大学, 2013, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2013-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12764>

RIGHT:

許諾条件により要旨・本文は2014-04-01に公開

中性子吸収材エルビアを用いた
濃縮度 5wt%を超える
原子炉用燃料の実現に関する研究

山崎 正俊

目 次

目 次	i
図 表 一 覧	iv
第 1 章 序 論	1-1
1.1 研究の背景	1-1
1.2 現状の整理	1-3
1.2.1 濃縮度 5wt%超への取り組み	1-3
1.2.2 先行研究の整理	1-4
1.3 本研究の目的と構成	1-7
1.3.1 目 的	1-7
1.3.2 構 成	1-8
第 2 章 エルビアクレジットの提案	2-1
2.1 緒 言	2-1
2.2 濃縮度向上に関する現状と課題	2-2
2.2.1 濃縮度と燃料サイクルコスト	2-2
2.2.2 濃縮度に関する規制	2-2
2.2.3 燃料サイクルインフラ	2-6
2.2.4 濃縮度向上に関する現状と課題	2-8
2.3 濃縮度向上の課題に対する解決策	2-8
2.3.1 エルビアクレジット	2-9
2.3.2 エルビアクレジットの効果	2-10
2.3.3 エルビア供給シナリオ	2-11
2.4 ま と め	2-13
第 3 章 エルビア核特性データの取得	3-1

3.1	緒 言.....	3-1
3.2	方 法.....	3-3
3.2.1	予備実験.....	3-3
3.2.2	本格実験の炉心策定	3-5
3.2.3	エルビア模擬板の製作.....	3-6
3.2.4	炉心の構築	3-6
3.3	結 果.....	3-9
3.3.1	臨界近接.....	3-9
3.3.2	エルビア板置換反応度	3-9
3.3.3	臨界性の解析	3-10
3.3.4	エルビア板置換反応度の解析	3-10
3.4	考 察.....	3-11
3.4.1	臨界性解析	3-11
3.4.2	エルビア置換反応度解析	3-12
3.4.3	臨界安全性評価ツールの確認	3-13
3.5	まとめ	3-14
第 4 章 エルビアクレジットを用いた臨界安全性評価		4-1
4.1	緒 言.....	4-1
4.2	方 法.....	4-3
4.2.1	評価ツール	4-3
4.2.2	評価体系.....	4-4
4.2.3	評価手順.....	4-6
4.3	結 果.....	4-7
4.3.1	臨界安全性評価	4-7
4.4	考 察.....	4-10
4.4.1	エルビア添加量の算出—ECOS 図	4-10
4.5	まとめ	4-11
第 5 章 エルビアクレジット燃料の経済性評価.....		5-1

5.1	緒 言	5-1
5.2	方 法	5-2
5.2.1	検討シナリオ	5-2
5.2.2	発電コスト	5-7
5.2.3	燃料サイクルコスト	5-9
5.2.4	エルビアペナルティの考慮	5-12
5.3	結 果	5-14
5.3.1	エルビアペナルティの効果	5-14
5.3.2	燃料サイクルコスト	5-15
5.3.3	発電コスト	5-16
5.4	考 察	5-17
5.4.1	感度解析	5-17
5.4.2	供給シナリオ	5-19
5.5	まとめ	5-20
第 6 章 結 論		6-1
6.1	本研究の成果	6-1
6.1.1	エルビアクレジットの提案	6-1
6.1.2	エルビア臨界実験の実施	6-2
6.1.3	臨界安全性評価手法の提示	6-2
6.1.4	導入効果の確認	6-3
6.2	本研究の意義	6-4
6.3	今後の展望	6-5
付録: エルビアクレジット燃料の 製造性確認		A-1
謝 辞		B-1
関連出版物		C-1

図 表 一 覧

第 1 章

表 1.1 エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方	1-10
表 1.2 エルビアクレジット燃料と既存燃料の比較	1-11
表 1.3 フロントエンドにおけるエルビアクレジット燃料の技術的課題	1-12
図 1.1 主な可燃性毒物同位体の断面積の比較	1-13
図 1.2 エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方	1-14
図 1.3 本論文の構成と各章のつながり	1-15

第 2 章

表 2.1 核物質の区分表	2-14
表 2.2 規制対象核物質とその有意量	2-15
表 2.3 規制対象核物質とその探知時間	2-16
表 2.5 (a) 希土類の確認埋蔵量と可採埋蔵量 ¹	2-17
表 2.5 (b) 希土類の確認埋蔵量と可採埋蔵量 ⁴	2-17
図 2.1 濃縮度と運転サイクル長および取出燃焼度の相関	2-18
図 2.2 濃縮度と取出燃焼度および燃料サイクルコストの相関	2-19
図 2.3 エルビア入り燃料とガドリニア入り燃料の燃焼に伴う集合体増倍率の比較	2-20
図 2.4 希土類の産出量と地域別内訳 (USGS (米国地質調査所) のホームページより)	2-21
図 2.5 希土類元素の典型的な価格 (USGS (米国地質調査所) の 2006 年版『鉱物資源希土類年鑑』の 数値より筆者が作図)	2-22
図 2.6 主な希土類鉱石における希土類元素の含有率 (USGS (米国地質調査所) の 2006 年版『鉱物資源希土類年鑑』の 数値より筆者が作図)	2-23

第 3 章

表 3.1 予備実験におけるエルビア置換反応度価値測定結果	3-16
表 3.2 予備実験におけるエルビア置換反応度価値計算結果	3-17
表 3.3 本格実験の事前設計例 (臨界炉心諸元)	3-18
表 3.4 燃料要素の材料特性一覧	3-19
表 3.5 KUCA エルビア燃料装荷炉模擬炉心一覧	3-20
図 3.1 エルビアクレジット燃料と既存燃料の比較	3-21
図 3.2 KUCA の炉心概要	3-22
図 3.3 サンプルエルビア板 (予備実験用試作品)	3-23
図 3.4 予備実験炉心構成図 (A3/8”P36EU(3))	3-24
図 3.5 予備実験におけるサンプル置換用セル (A3/8”P36EU(3))	3-25
図 3.6 基準セルの燃料体への実装	3-26
図 3.7 エルビアサンプルセルの燃料体への実装	3-27
図 3.8 サンプル燃料体及び炉心への装荷	3-28
図 3.9 本格実験の事前設計例 (燃料単位セル構成図および炉心配置図)	3-29
図 3.10 サンプルエルビア板	3-30
図 3.11 燃料体と制御棒の断面図	3-31
図 3.12 各炉心の燃料体単位セル構成図	3-32
図 3.13 各炉心の燃料体炉心配置図	3-33
図 3.14 各炉心の中性子スペクトル	3-34
図 3.15 Core-2 における金線反応率分布測定結果 (炉中心で規格化)	3-35

図 3.16 Core-3 における金線反応率分布測定結果（炉中心で規格化）	3-36
図 3.17 実効増倍率 k_{eff} の計算値と測定値の比較（MVP コードによる計算結果）	3-37
図 3.18 エルビア板置換反応度の測定値と計算値の比較（MVP コードによる計算結果, Core-1）	3-38
図 3.19 エルビア板置換反応度の測定値と計算値の比較（SRAC コードによる計算結果, 各炉心）	3-39
図 3.20 実効増倍率 k_{eff} の C/E の主要パラメータ依存性（MVP コードによる計算結果）	3-40
図 3.21 CITATION によるエルビア板置換反応度の解析値と実験値の比較（C/E 値）	3-41
図 3.22 TWOTRAN によるエルビア板置換反応度の解析値と実験値の比較（C/E 値）	3-42
図 3.23 KUCA 臨界実験解析の比較結果（バイアス補正後）	3-43

第 4 章

表 4.1 KUCA 臨界実験における炉心特徴の比較	4-13
表 4.2 均一球体系における未臨界判定サーベイ計算結果	4-14
表 4.3 燃料集合体ラック体系における増倍率計算結果（エルビア無し）	4-15
図 4.1 KUCA 臨界実験の炉心概要	4-16
図 4.2 KUCA 臨界実験の燃料配置	4-17
図 4.3 KUCA 臨界実験解析の比較結果（バイアス補正後）	4-18
図 4.4 水密条件付 大型球体系	4-19
図 4.5 無限繰り返し形状 燃料集合体貯蔵ラック体系	4-20
図 4.6 濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビア濃度の評価結果（均質な単純形状）	4-21
図 4.7 水密条件付 大型球体系における増倍率評価結果（濃縮度 5wt%燃料）	4-22
図 4.8 水密条件付 大型球体系における濃縮度 5wt%超燃料の増倍率評価結果（ UO_2 粉末密度 3.5 g/cm^3 ）	4-23
図 4.9 濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビア濃度の評価結果（水密条件付 大型球体系）	4-24
図 4.10 燃料集合体貯蔵ラック体系における濃縮度 5wt%超燃料の増倍率評価結果（エルビア無し）	4-25
図 4.11 濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビア濃度の評価結果図（燃料集合体貯蔵ラック体系）	4-26
図 4.12 ECOS (Erbia Content for Sub-criticality judgment)図：濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビア濃度の包絡線	4-27

第 5 章

表 5.1 コストパラメーター一覧	5-22
表 5.2 比較条件の一覧	5-23
表 5.3 成型加工費の数値一覧	5-24
表 5.4 比較ケースの一覧	5-25
図 5.1 燃料濃縮度と臨界質量の相関*	5-27
図 5.2 ECOS (Erbia Content for Sub-criticality judgment) 図	5-28
図 5.3 エルビアペナルティの燃焼度依存性評価結果	5-29
図 5.4 バッチ平均取出燃焼度の燃料濃縮度依存性の比較（エルビア有・無）	5-30
図 5.5 燃料サイクルコスト評価結果	5-31
図 5.6 発電コスト評価結果	5-32
図 5.7 燃料サイクルコスト評価結果（バックエンドコストの増加を考慮）	5-33
図 5.8 発電コスト評価結果（バックエンドコストの増加を考慮）	5-34
図 5.9 燃料サイクルコスト評価結果（固定サイクル長での評価）	5-35
図 5.10 発電コスト評価結果（固定サイクル長での評価）	5-36

第 6 章

表 6.1 フロントエンドにおけるエルビアクレジット燃料の技術的課題	6-7
表 6.2 (a) エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方 (従来)	6-8
表 6.2 (b) エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方 (今後)	6-9
図 6.1 エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方	6-10

付録

表 A.1 Er_2O_3 添加量	A-4
表 A.2 Er_2O_3 添加 UO_2 焼結体の評価	A-5
表 A.3 焼結体の密度	A-6
表 A.4 Er_2O_3 定量結果	A-7
図 A.1 金相観察：焼結体切断面	A-8
図 A.2 ペレットの外観写真 (試料 ER4)	A-9
図 A.3 研磨面の光学顕微鏡写真 (試料 ER4)	A-10
図 A.4 $(\text{U}, \text{Er})\text{O}_2$, $(\text{U}, \text{Gd})\text{O}_2$ の XRD パターン	A-11
図 A.5 Er_2O_3 or Gd_2O_3 添加ペレットの格子定数	A-12
図 A.6 マッピング (1000 倍で撮影)	A-13

第1章 序 論

1.1 研究の背景

現在、国内加圧水型軽水炉（PWR）においては燃焼度制限 55 GWd/t^aの高燃焼度ステップ 2 燃料の実炉利用が順次開始されており、次世代のステップ 3 燃料は更に高燃焼度となることが想定されている。更なる高燃焼度化に向けた材料開発、炉心概念の検討は国内外で継続して行われており、燃料の取出燃焼度 70 GWd/t 以上を視野に入れた研究開発^{1,2)}もなされている。

燃料の高燃焼度化により燃料サイクルコスト^bの改善および使用済燃料体数の削減が期待できるが、燃料のウラン濃縮度^cを上昇させることにより、高燃焼度化と同時に原子炉の運転サイクル長を長期化し、発電コスト^dの改善が可能となる。現在、国内外における燃料サイクル関連のインフラでは濃縮度 5wt%以下を前提として臨界安全設計が為されているが、後述するようにこの 5wt%という値には必ずしも明確な根拠はなく、所謂ディファクトスタンダードとして今日に至ったものである。今後のさらなる高燃焼度化および将来的な使用済燃料発生量の抑制の観点からは、この 5wt%の前提を超えて濃縮度を上昇させることが望まれる。

一方、去る 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震を契機とする東京電力福島原子力発電所事故^{3,4)}は炉心溶融およびそれに引き続いて発生した放射性物質の広範囲への拡散により、我が国の原子力開発の歴史において未曾有の災害となった。当該事故により我が国の原子力安全規制および原子力政策は見直しを余儀なくされ、事故から 2 年以上経過した今なお多くの原子力プラントについて再稼働の目処が立っていない状況である。

福島原子力発電所事故は我が国のみならず、世界各国の原子力政策にも少なからず影響を与えた。このうちドイツやイタリアなど元々原子力慎重派が政治の一翼を担っていた国においては一気に原子力撤廃へ舵を切り、日本やフランスなど原子力をエネルギー

^a 燃焼度とは燃料中の金属ウラン重量 1t あたりの原子炉内での発生エネルギー量を示したもので、燃料の性能や使用可能範囲を示す際に頻繁に用いられるパラメータである。日本の PWR 市場においては、燃焼度制限 48GWd/t のステップ 1 燃料、55GWd/t のステップ 2 燃料、62GWd/t 程度のステップ 3 燃料がある。現在、ステップ 1 からステップ 2 燃料への移行中であり、将来的にはステップ 3 燃料が導入される見込みである。

^b 単位電力量を発生させるために必要となる燃料費(単位は¥/kWh)。原料となるウランの採鉱・精製・転換・濃縮・再転換・成型加工・中間貯蔵・再処理・最終処分費などから成る。

^c 天然に産出するウランは核分裂性の ²³⁵U の同位体割合は 0.7wt%程度であるが、軽水減速原子炉ではウラン燃料を効率よく燃焼させるため、²³⁵U の割合を増加させて利用している。この ²³⁵U の割合を増加させることを濃縮といい、その際の ²³⁵U 割合を濃縮度と呼ぶ。

^d 単位電力量を発生させるために必要となる全ての費用(単位は¥/kWh)。原子力発電所の建設費、運転費、維持費、燃料費などから成る。

政策の中心に据えていた国においても原子力縮小への政策転換を余儀なくされた。また米国やカナダなど、近年の天然ガスの採掘法の革新により、原子力発電が新型天然ガス火力発電とのコスト競争に晒されている国もある。一方で、積極的な経済発展を目論む中国、インド、ロシア等の国では福島原子力発電所事故後も原子力拡大への方針を堅持しているものの、その導入速度は若干低下している。これらを考慮すると、世界の原子力発電増加量は3月11日の震災前の予測よりは減少するものの、依然として一定のシェアを占めつつ増加していくことが予想されている^{5,6)}。

原子力縮小を打ち出した我が国においても、エネルギー自給率が4%程度である現実を踏まえるならば、エネルギー安定供給、二酸化炭素排出量削減、国内経済の競争力維持、エネルギー技術の国際貢献などの観点から、安全性確保を前提に一定量の原子力を維持すべきであるとの意見が認識されつつある。前出の"World Energy Outlook 2012"における我が国の発電量割合の推移では、震災直後は原子力が激減し、それを補完するために石油および天然ガス火力が急増しているが、その後は徐々に原子力の割合は復調し、以後2035年まで原子力が一定の割合を維持することが予測されている。このように我が国が今後も原子力を利用していくためには、安全性確保のための不断の改善が必要となることは当然として、併せて、原子炉利用の高効率化、使用済燃料の削減、既存インフラの有効活用などの観点が以前にも増して重要となる。

このうち、原子炉利用の高効率化とは換言すれば原子炉の設備利用率の向上であり、運転サイクル長の長期化や熱出力の増加(出力アップレート)により実現される。また、使用済燃料削減のためには燃料の一体あたりの発生エネルギー量を増大させる必要があり、これは既に述べたように燃料の高燃焼度化によってなされる。燃料の高燃焼度化と原子炉の設備利用率向上を同時に達成するためには、燃料の初期ウラン濃縮度の上昇が有効であるが、国内外における燃料サイクル関連のインフラでは濃縮度5wt%以下を前提として設計がなされている。このため、この5wt%の前提を超えて濃縮度を上昇させるには既存の全てのインフラに対して設計変更、設備改造、再許可の取得などが必要となり、これらに伴う費用が膨大となることが危惧されている。

濃縮度向上におけるこれらの課題を克服するための解決策として、本研究では新たなコンセプトである『エルビアクレジット』を提案する⁷⁾。これは、濃縮度5wt%を超える全てのウラン燃料について再転換後に低濃度のエルビア(酸化エルビウム; Er_2O_3)を混入し、濃縮度5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保することにより、それ以後の輸送や成型加工施設における臨界安全上の設計変更を不要とするという概念である⁸⁾。このエルビアクレジットを用いたエルビア入り次世代高燃焼度燃料(エルビアクレジット燃料)は、高濃縮度燃料の利点を活かしつつ、大幅な設備変更・設備投資

⁸⁾ 対象とする体系の反応度を評価する際、十分な信頼性をもって存在を期待することができる反応度低下量を見込んで、臨界安全評価を実施することを、「クレジットを見込む」あるいは「クレジットを採る」と表す。代表的な例として、燃焼度クレジット、ガドリニアクレジットなどがある。詳しくは1.2.4節参照。

を回避できる画期的な燃料である。輸送量，加工量，貯蔵量など取扱量も減少させる必要がないので，作業効率・輸送効率・貯蔵効率の向上も期待できる。濃縮度 5wt%超燃料の導入に伴う懸案の大部分を解決し，当該燃料の導入を促進するものであるといえる。

本章では，まずは現状の整理として濃縮度 5wt%超燃料導入への取り組みとエルビア燃料に関する先行研究について調査する。それを踏まえてエルビアクレジット燃料の技術課題を示し，本研究で解決する項目について明確にする。

1.2 現状の整理

濃縮度 5wt%を超える燃料について再転換後全てのウラン燃料粉末に低濃度の中性子吸収材（エルビア； Er_2O_3 ）を混入し，濃縮度 5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保できれば，それ以降の輸送や成型加工施設における臨界安全に関する影響を解消あるいは軽減できるものと考えられる。本節ではこの濃縮度 5wt%超エルビアクレジット燃料に関連し，過去の知見や先行研究などの現状を整理する。

1.2.1 濃縮度 5wt%超への取り組み

濃縮度 5wt%超燃料の導入に関して国内外の状況を俯瞰すると，幾つかの濃縮施設が実際に当局からの認可を取得しているものの，濃縮工程より以降の核燃料サイクル施設では，いまだに濃縮度 5wt%以下が制限値となっており，5wt%超の燃料を扱える状態になっていない。5wt%超燃料の導入のためには，これまでも下記のように幾つかの懸案が指摘されている。

- ・ 設計および許認可取得するための，濃縮度 5wt%を超える燃料の核特性データおよび設計コードの妥当性確認データが不十分である⁸⁾
- ・ 臨界安全の観点から大幅な設計変更，設備変更，再許認可が必要となり，膨大な投資が発生する懸念がある
- ・ 反応度の増加に伴い，取扱量を低減させる必要があるため，生産効率，貯蔵効率，輸送効率などが低下し，経済性を損なう
- ・ 濃縮度 5wt%超燃料の導入によるコストメリットが，これらの投資に見合うものか否か，見極めが難しい

我が国においても濃縮度 5wt%を超えることによる使用済み燃料の低減効果あるいは燃料サイクル費低減効果は認識されている。しかしながら，国内では特に濃縮度 5wt%を超えると「特定加工施設審査指針」の適用を受けるため，諸外国と比較して更に大幅な設備変更・設備投資が必要になる可能性があり，濃縮度 5wt%超燃料導入あるいは検討そのものを躊躇させる要因となっていた。

このような状況を反映し，1998年には米国原子力学会（American Nuclear Society,

ANS)の年会において臨界安全部会 (Nuclear Criticality Safety Division, NCSD)主催の特別セッションが開かれている。この特別セッションでは燃料の燃焼度向上のための臨界安全性評価について議論され^{9,10)}、この濃縮度 5wt%の課題を「5wt%の壁 (5wt% Barrier)」と命名している。

また、2009 年には同じく米国原子力学会主催で原子燃料管理の研究開発に特化した国際会議 (Advances in Nuclear Fuel Management IV, ANFM 2009)が開催され、筆者の提唱により濃縮度 5wt%超への取り組みに関する特別セッションが開かれた^{11,12,13)}。ここでも濃縮度 5wt%の課題と取り組みについて筆者の報告を含めて 5 件の発表がなされている。

以上のように、濃縮度 5wt%超燃料の必要性やニーズについては予めから議論されているものの、市場導入は世界的に未だ具体化していない。

1.2.2 先行研究の整理

1) エルビアの核特性

原子力分野においては、ガドリニウムの酸化物であるガドリニアが可燃性毒物として世界的に広く使用されている。エルビアについては米国やロシアの一部の原子炉で可燃性毒物として使用されているが、これまで日本国内での使用実績は無い。原子炉における核特性の観点からエルビアの特徴を以下に述べる。

まず、代表的な可燃性毒物であるガドリニア、ボロンに対し、エルビアの中性子吸収特性の違いを示す。図 1.1 はガドリニア、エルビア、そしてボロンの構成元素のうち、可燃性毒物として主に寄与する 4 つの核種 (^{167}Er , ^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{10}B) の中性子吸収断面積を示している。この図は、エルビアに対する使用実績のある JEF2.2 断面積ライブラリセット¹⁴⁾から値を引用し、筆者が作図したものである。ここで、中性子吸収断面積が大きいほど、中性子を吸収する効果が大きい。

図 1.1 よりエルビウムの吸収断面積はガドリニウムより 2 桁程度小さく、ボロンと同程度であることが見て取れる。また、エルビウムには原子炉内で反応に寄与する熱外領域で大きな吸収断面積ピークがあることも他の可燃性毒物と異なる特徴である。

このような断面積の違いから、エルビアはガドリニアに比べて下記のような特性を原子炉内で示す。

- ・ 中性子の吸収量が比較的少なく、燃焼が緩やかである。このため、可燃性毒物として消滅する速度が遅く、炉心のサイクル長が十分長くなければ毒物としてのエルビアが燃え残ってしまう。
- ・ 同じく中性子の吸収量が比較的少ないため、燃焼に伴う反応度の変化が緩やかである。これにより炉心の反応度調整がしやすい、炉心内の出力ピーキングを低くできる、などの効果がある。

- ・ 減速材温度が上昇して中性子エネルギーが高い側にシフトした際、大きな吸収断面積ピークに中性子が多数吸収されることとなり、炉心の反応度が低下する。すなわち、減速材温度係数がより負側になる。

これらの特性はいずれも原子炉の長期サイクル運転に適したものであり、1980年代後半以降、運転サイクル長の長期化に伴ってエルビアは海外の原子炉で使用が開始された。

2) エルビア入り燃料

エルビアを原子炉燃料に混入させる概念について先行研究を調査したところ、以下のような知見が既に得られていることが分かった。

- ・ エルビアを原子炉燃料に混入させる概念は、PWR, BWR のみならず、RBMK（ロシア型黒鉛減速炉）、ガス炉、将来炉などを対象に幅広く検討されている。
- ・ 1980年代後半から90年代前半にかけては、CE社のエルビア燃料導入期にあたり、同社によるエルビア燃料の概念および長サイクルへの適用に関する論文が多い。
- ・ 2000年代になると次世代燃料、Pu消費燃料、岩石燃料などにエルビアを適用する研究報告が出てくる。

このうち、エルビアの実機導入を推進したCE社のA. Jonssonらは、1991年の論文¹⁵⁾にて下記のように報告している。

- ・ 高燃焼度化と長サイクル化に対応するため、エルビアをウランに混入させる燃料を開発した。
- ・ 91年当時既に24ヶ月運転、取出燃焼度50～55 GWd/t、最高燃焼度60 GWd/tを達成した。
- ・ エルビウムの吸収断面積はガドリより相対的に小さいため、薄く多くの燃料棒に混入させることができ、出力ピーキングの低減に効果的である。
- ・ 0.5eV付近の巨大共鳴吸収が長サイクルの温度係数を負側にする効果がある。

また同じく1994年の論文¹⁶⁾では、

- ・ ウラン中のエルビア濃度0.5, 1.4, 2.5wt%について融点の測定を実施した。また熱伝導度についてはエルビア濃度0, 0.5, 0.9, 1.4, 2.5wt%について測定を実施した。いずれも既に得られているガドリニアの結果と極めて近いものであった。
- ・ エルビア混入により熱伝導度の若干の低下に伴う燃料温度上昇、FPガス放出率の増加およびそれに伴う被覆管内圧が増加する傾向があるが、出力ピーキングの低減と相まって他の毒物より熱的余裕は増大する。
- ・ エルビア混入燃料は既存のウラン成型加工プロセスとほとんど同様の手順によって加工することが可能である。

と物性や製造性に問題が無いことを報告している。

また、ロシアのクルスク発電所（RBMK）でも濃縮度 2.8wt%，エルビア濃度 0.6wt% の燃料を使用しているとの情報もある¹⁷⁾。これによると、クルスク発電所では 1999 年より濃縮度 2.6wt% の燃料を約 5000 体使用した実績があるようであり、このような比較的低濃度のエルビア燃料についても、加工上問題は無いと考えられる。

3) 臨界安全クレジット

臨界安全性評価において対象とする体系の反応度を評価する際、十分な信頼性をもって存在が期待できる反応度低下量を見込んで、臨界安全性評価を実施することを、「クレジットを見込む」あるいは「クレジットを採る」と表す。代表的な例として、燃焼度クレジット、ガドリニアクレジットなどがある。以上をまとめて、表 1.1 および図 1.2 に示す。

このうち、燃焼度クレジットは、燃料の燃焼に伴う反応度の低下を考慮し、ある燃焼度以上であることを保障することで、その燃料の未臨界度がその設備の臨界安全性評価に用いられた未臨界度以下であることを担保している。クレジットの中では最も広く実用化され、研究も進んでいる例である^{18,19)}。

また、ガドリニアクレジットは、燃料に中性子吸収材であるガドリニアが必要量存在していることを保障することで、その燃料の燃焼を通じた最大の反応度がその設備の臨界安全性評価に用いられた反応度以下であることを担保するものである。同じく参考文献 18 によれば、燃焼を通じた最大反応度を考慮する観点から、ガドリニアクレジットも広義の燃焼度クレジットと位置づけられている。

一方、本研究で提唱するエルビアクレジットは、ウランの粉末全てに中性子吸収材であるエルビアが必要量混入していることを保障することで、そのウラン粉末の未臨界度がその設備の臨界安全性評価に用いられた未臨界度（即ち濃縮度 5wt% のウラン粉末の未臨界度）以下であることを担保するものである。未燃焼を前提としていることから、エルビアクレジットも広義の燃焼度クレジットと見なすことも可能であろう。

このように、エルビアクレジットは従来の燃焼度クレジット、ガドリニアクレジットと比較し、①燃料集合体でなくウラン粉末を対象としていること、②燃焼を考慮していない未燃焼状態を対象としていること、③濃縮度 5wt% 超を対象とすること、などが従来にない固有の概念である。

なお、クレジットについては「反応度の低下」そのもの、または、「反応度の低下を考慮すること」の双方の定義が混在しており、必ずしも統一されていないことを注記しておく^f。

^f 例えば参考文献 19 には、「燃料の燃焼に伴う反応度の低下を考慮することを燃焼度クレジットを採る」という。また、『燃焼度クレジット』そのものが、燃料の燃焼に伴う反応度低下を臨界評価において考慮することを指す場合もある」とある。

1.3 本研究の目的と構成

本研究では、新たなコンセプトであるエルビアクレジット燃料の実用化のため、特にエルビアの核特性データの取得を中心に、その技術的課題の解決を目的とする。具体的にはまずエルビアの核特性データを取得し、取得したデータを用いて設計ツールの妥当性を確認し、エルビアクレジットを用いた臨界安全性評価、さらに発電コスト・燃料サイクルコストからみた導入効果の確認を実施する。

1.3.1 目的

前節までに述べたとおり、エルビアクレジットとは濃縮度 5wt%を超える燃料について再転換後全てのウラン燃料粉末にエルビアを混入し、濃縮度 5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保することで、それ以降の輸送や成型加工施設における臨界安全に関する課題を解消する概念である。エルビアクレジットの適用により、現状通りの設備設計のままで臨界安全性を担保することが可能となるため、大幅な設備変更・設備投資が不要となることが期待できる。さらに、毒物クレジットを適用しない場合と比較して、取扱量（単位輸送容器の輸送量、加工施設における加工量、貯蔵庫における貯蔵量など）を増加させることが出来るので、作業効率・輸送効率・貯蔵効率の向上を図ることができる。

本研究で提唱するエルビアクレジット燃料と既存の毒物入り燃料との比較を表 1.2 にまとめる。1.2 節に示した通り、エルビア自体は中性子吸収材として米国やロシアの商業炉で使用実績があり、製造実績・照射実績共に存在する。しかしながら、毒物クレジットとして「濃縮度 5wt%を超える燃料全てに薄く混入させ、その反応度を濃縮度 5wt%以下と等価もしくはそれ未満とする」というコンセプトは過去に実施例はなく、本研究の固有の視点である。エルビアクレジット燃料は濃縮度 5wt%超燃料の実用化を促進することに主眼を置いているため、この観点から表 1.3 に挙げるような技術課題の解決が必要となる。このうち特に、下記の項目が本研究で扱う検討テーマである。

- ・ これまで十分なデータが得られていない高ウラン濃縮度、低エルビア濃度、低水分割合などの環境下でのエルビア核特性データの取得
- ・ 断面積データおよび臨界安全性評価コードの妥当性確認
- ・ 燃料サイクルにおける各施設において必要十分な未臨界度を担保するためのエルビア混入量の決定とその評価法の検討
- ・ 得られたエルビア核特性データ、必要エルビア量に対して、実際に当該燃料を導入した際の経済性評価

上記以外の技術課題のうち、エルビアクレジット燃料の製造性確認試験については付録として巻末に示した。また、本研究には含めないがエルビアクレジットを用いた原子

炉用燃料の核設計および機械設計については、それぞれ別の論文にて論じているので参照されたい^{20,21)}。

以上のように、新たなコンセプトであるエルビアクレジットを用いた濃縮度 5wt%超燃料について、科学的知見と合理的考察に基づいてその成立性を示し、当該燃料の実現に資することが本研究の目的である。本研究で得られる知見は単にエルビアクレジット燃料のみならず、今後開発が進むであろう次世代の高濃縮度燃料開発に関しても多いに貢献することが期待されるものである。

1.3.2 構成

以上を踏まえ、本論文の構成と各章のつながりを以下に述べる。

本論文は序論である本章と末尾の結論を含めた全 5 章にて構成される。各章のつながりは図 1.3 に示す。

はじめに第 1 章「序論」では、研究の背景として濃縮度 5wt%超燃料の必要性を示すとともに、濃縮度 5wt%燃料導入のための先行研究や関連技術の実績を調査し、研究の目的と本論文にて対象とする検討項目を明示する。

第 2 章「エルビアクレジットの提案」では原子炉における濃縮度と経済性の相関について説明し、更なる経済性向上のためには濃縮度 5wt%超燃料の導入が必要であることを示す。一方で、濃縮度に関する国内外の規制の現状について概説する。これらを踏まえ、第 1 章で述べた課題を解決するための方策としてエルビアクレジットの概念を提案する。

次に第 3 章「エルビア核特性データの取得」においては、臨界実験の実施によるエルビアクレジット燃料の核特性データ取得について述べる。ここでは、エルビアクレジットの実用化を鑑みて要求される臨界実験の仕様の検討、実験体系の説明、測定結果の取得について説明する。さらに、実験にて得られた核特性データに対し、核設計ツールの計算結果と比較し、断面積データと核設計ツールの妥当性について検証する。

第 4 章「エルビアクレジットを用いた臨界安全性評価」では、第 2 章で得られた核特性データと検証された計算ツールを用いて臨界安全性評価を実施する。具体的には、エルビアクレジットへの要求仕様として濃縮度 5wt%を超える燃料の反応度を 5wt%以下と等価にするために必要なエルビア濃度を算出する。このとき、原子炉だけでなく燃料フロントエンドにおける様々なスペクトル条件を考慮するため、体系の選択や評価手順について考察する。

そして第 5 章「エルビアクレジット燃料の経済性評価」では、エルビアクレジット燃料の供給シナリオや導入効果の検証を行う。このとき、エルビアを使用する際に留意すべきエルビアペナルティについて、第 3 章で得られた核特性データおよび第 4 章で決定した燃料仕様を活用して定量的に評価する。

最後に第 6 章「結論」にて，本研究の成果と意義を総括し，今後の課題について言及する。

表 1.1 エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方

	分類	対象	初期濃縮度	臨界設計	備考
①	濃縮度 5wt%超燃料向け エルビアクレジット	エルビア混入後～ 発電所新燃料プール (フロントエンド)	5wt%超	所要のエルビア量が存在していることで濃縮度 5wt%燃料の初期反応度 (図 1.2 の R1) で設計	本研究の対象
②	ガドリニアクレジット	使用済燃料輸送 (バックエンド)	5wt%以下	所要のガドリニア量が存在していることで燃焼 中最大反応度 (図 1.2 の R2) で設計	現行 BWR にて適用
	(現状、クレジットの 適用無し)	再処理施設受け入れ設備 (バックエンド)	5wt%以下	燃焼度に関わらず濃縮度 5wt%燃料の反応度 (図 1.2 の R1) で設計	
③	燃焼度クレジット	燃焼度測定後～ 溶解槽 (バックエンド)	5wt%以下	一定の燃焼度 (図 1.2 の B1) 以上であることで 残存濃縮度 3.5wt% (図 1.2 の R3) で設計	濃縮度 3.5wt%以上 の際はガドリニア溶 液によるクレジット も認められている

表 1.2 エルビアクレジット燃料と既存燃料の比較

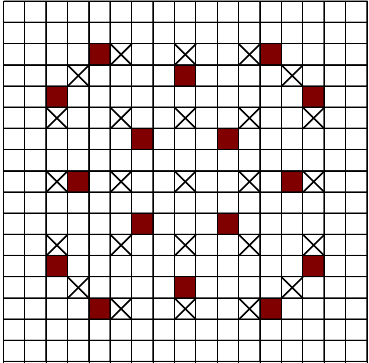
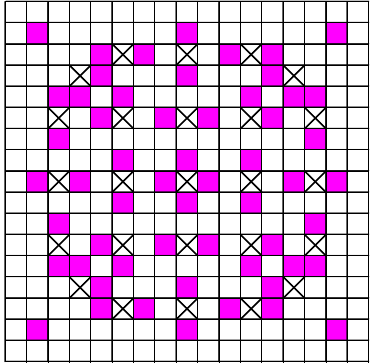
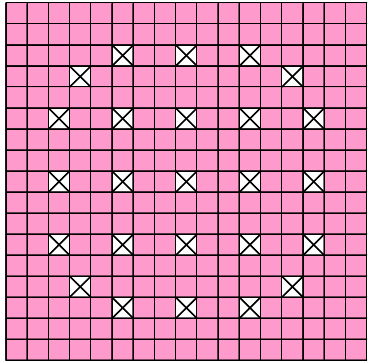
	既存ガドリニア燃料 (国内外多くの軽水炉)	既存エルビア燃料 (米 CE 炉, 露 RBMK 炉)	エルビアクレジット燃料
ウラン濃縮度	5wt%以下	5wt%以下	5wt%超
添加量	4～10wt%	2～3wt%	0.2～1wt%
使い方	集合体内の特定の燃料棒 にのみ混入	集合体内の特定の燃料棒 にのみ混入	集合体内の全燃料棒に混入
集合体内 燃料棒配置例	 <p>□: UO₂棒 ⊗: 制御棒 ■: Gd入り</p>	 <p>□: UO₂棒 ⊗: 制御棒 ■: Er入り</p>	 <p>■: Er入り ⊗: 制御棒</p>

表 1.3 フロントエンドにおけるエルビアクレジット燃料の技術的課題

	技術的課題	実施項目	達成状況	備考
濃縮 再転換	(エルビアクレジット適用なし)			———
成型 加工	臨界安全性評価 手法の確立	エルビアおよび濃縮度 5wt%超燃料の核データ の取得	KUCA にて臨界実験を実 施し，臨界性，エルビア 反応度価値を測定	第 3 章
		臨界安全性評価に用い る断面積データ，核計算 ツールの検証	KUCA 臨界実験の解析を 行い，測定値と比較	
		エルビアクレジットを 用いた臨界安全手法の 開発	未臨界性を担保するた めに必要なエルビア濃 度を決定し，施設の臨 界安全性評価を実施	第 4 章
	製造性確認	エルビア入り燃料ペ レットの製造性の確認	実験室規模で製造試験 を実施	付録
輸送	臨界安全性評価 手法の確立	エルビアクレジットを 用いた臨界安全手法の 開発	(成型加工の臨界安全 性評価手法の確立と同 様)	第 4 章と 同様
原子炉	核設計 (集合体 設計，核設計)	エルビア入り燃料を用 いた炉心の成立性の検 討	エルビアクレジットに必 要なエルビア量を満足 しつつ，炉心が成立す ることを確認	別稿*)
	機械設計	エルビア入り燃料の物 性値測定	健全性評価に必要な主 要物性値を測定	別稿†)
		エルビア入り燃料の健 全性評価	(エルビア入り燃料の 照射実績は海外に多数 あり，低濃度の場合は エルビア無し燃料と同 等)	確認済

*) “Development of Erbium-bearing Super High Burnup Fuel”, A. Yamamoto, M. Yamasaki et al., International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP’06) : 2006 年 6 月など

†) “Development of Erbium-Bearing Super High Burnup Fuel”, S. Yamanaka, M. Yamasaki et al., Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM2008) : 2008 年 10 月など

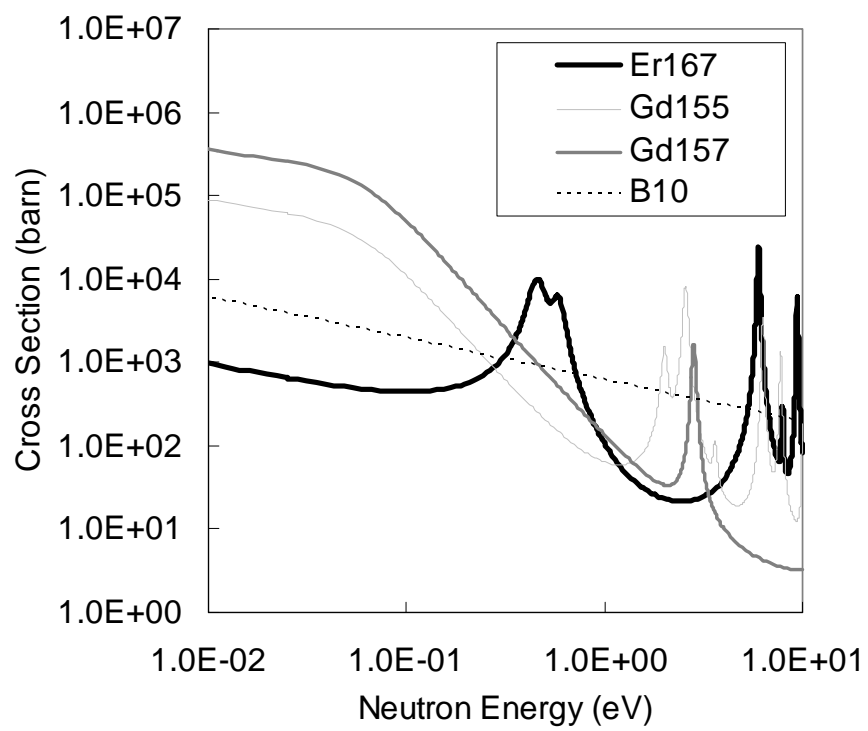


図 1.1 主な可燃性毒物同位体の断面積の比較

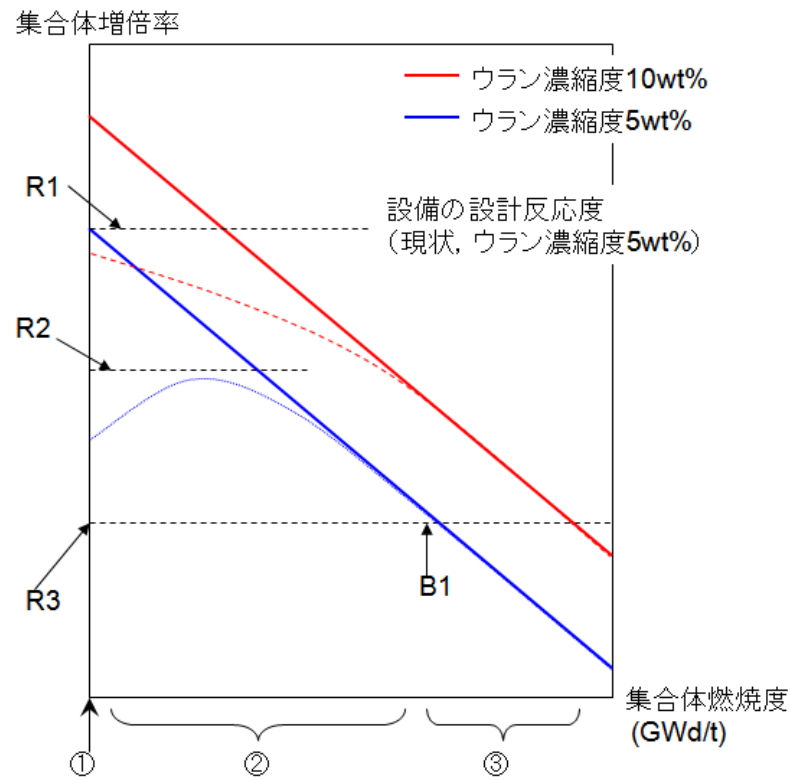


図 1.2 エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方

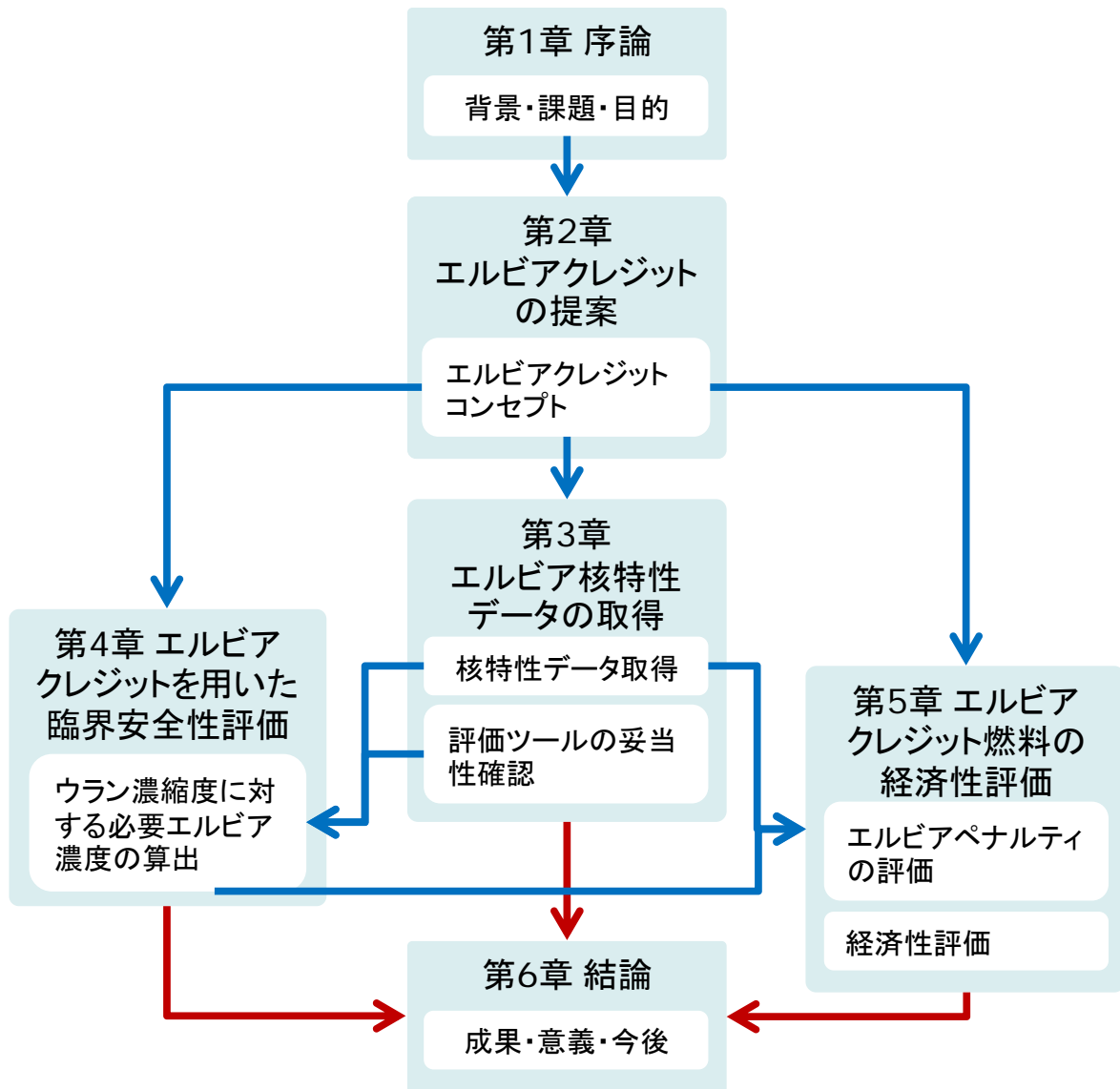


図 1.3 本論文の構成と各章のつながり

【第 1 章の参考文献】

- 1) 財団法人 エネルギー総合工学研究所, 「次世代軽水炉等技術開発に係る中間評価報告書」 (平成 22 年 7 月 29 日)
- 2) T. Yamamoto, K. Kurosaki, et al., “Development of Next-Generation Light Water Reactor in Japan,” IAEA-CN-164-3S07, (2009).
- 3) 「東京電力福島原子力発電所事故調査委員会 (国会事故調) 報告書」 (平成 24 年 6 月)
- 4) 「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会 最終報告」 (平成 24 年 7 月)
- 5) "World Energy Outlook 2012", OECD/IEA, (2012).
- 6) 日本原子力産業会議, 「2012 年版 世界の原子力発電開発の動向」, (2012).
- 7) A. Yamamoto, H. Unesaki, et al., “Development of Erbium-bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '06), Reno, Nevada, USA, June 4-8, (2006).
- 8) US Nuclear Regulatory Commission, “Statement of Work NRC-02-05-004: Identification of Significant Nuclear Criticality Safety Issues Associated with Processing Uranium Enriched Up To Ten Weight Percent”, December, (2004).
- 9) D. R. Damon, D. C. Morey, “Criticality Safety Limits at 5 to 20% Enrichment,” American Nuclear Society Annual Meeting, Nashville, TN, USA, June 7-11, (1998).
- 10) L. E. Paulson, W. C. Peters, “GE Validation to Support Fuel Fabrication up to 10% Enrichment,” American Nuclear Society Annual Meeting, Nashville, TN, USA, June 7-11, (1998).
- 11) K. Yoshioka, S. Watanabe, et al., “A Minimal-Content Gadolinium in Above 5wt% Enrichment Fuel for Criticality Safety in Next-Generation LWR,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head, SC, USA, April, (2009).
- 12) D. Lancaster, C. Rombough, et al., “Criticality Safety Issues Associated with Uranium Enriched Up to Ten Weight Percent,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head, SC, USA, April, (2009).
- 13) A. A. Karve, T. N. Sloma, et al., “Exploratory studies for challenges to design constraints with higher enrichment,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head, SC, USA, April, (2009).
- 14) OECD-NEA, “The JEF-2.2 Nuclear Data Library,” JEFF Report17, April, (2000).
- 15) L.V. Corsetti, S.C. Hatfield A. Jonsson, “Recent Advances in PWR Fuel Design at ABB-CE,” Proc. International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Avignon, France, April 21-24, (1991).

- 16) I. B. Fiero, A. Jonsson, et al., "Status of erbium burnable absorber development at ABB combustion engineering nuclear fuel," Proc. 1994 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, West Palm Beach, Florida, April 17-21, (1994).
- 17) Platts NuclearFuel Vol.30, No.5, Feb.28, (2005).
- 18) "Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition", IAEA-TECDOC-1547, May, (2007).
- 19) 日本原子力研究所, 「燃焼度クレジット導入ガイド原案」, JAERI-Tech-2001-55, (2001).
- 20) A. Yamamoto, M. Yamasaki et.al., "Development of Erbia-bearing Super High Burnup Fuel," Proc. International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP' 06), June, (2006).
- 21) S. Yamanaka, M. Yamasaki et al., "Development of Erbia-Bearing Super High Burnup Fuel," Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM2008), Seoul, Korea, October 19-22, (2008).

第2章 エルビアクレジットの提案

2.1 緒言

原子燃料サイクルにおいて、濃縮度 5wt%を超えることによる燃料コストの低減効果および発電コストの低減効果は定性的には広く認識されている。しかしながら、日本国内はもとより、国外においても『濃縮度 5wt%』は一種のデファクトスタンダードとなっており、燃料サイクルにおける全てのインフラが濃縮度 5wt%を前提に構築されていることから、「濃縮度 5wt%超の導入は非現実的」と一般的に認識されていた。特に日本国内においては濃縮度 5wt%超燃料を扱う再転換および成型加工施設に対しては「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」の適用を受けるため、諸外国と比較して更に大幅な設備変更・設備投資が必要になることが危惧されている。

このような状況を反映し、濃縮度 5wt%超燃料の導入に関しては、これまでに下記のような議論が繰り返されている。即ち

- ・ 燃料の高燃焼度化と原子炉の設備利用率向上を同時に達成するためには、本当に濃縮度 5%を超えることが必須なのか？
- ・ 海外を含め、濃縮度 5wt%を超える燃料は調達可能なのか？
- ・ 濃縮度 5wt%超燃料の実用化は現行の国内外の法の元では不可能なのではないか？
- ・ 逆に、濃縮度が 5wt%を超えても何ら課題はなく、現行燃料と同様に対処すればよいのではないか？

これらの問いに対し本章では、

- 1) 濃縮度向上の必要性和有効性（サイクル長、燃焼度と濃縮度の相関）
- 2) 濃縮度向上に関する現状と課題（国内外の規制とインフラの現状）
- 3) 濃縮度向上の課題に対する解決策（課題を克服するための新たなコンセプトの提案）

について示す。これにより、濃縮度 5wt%超燃料導入に関する課題が正しく認識され、議論が活性化されることにより、濃縮度 5wt%超燃料の導入が加速されることを期待する。

2.2 濃縮度向上に関する現状と課題

本節ではまず、燃料のウラン濃縮度と燃料サイクルコストの一般的な相関について定性的に述べ、濃縮度 5wt%超燃料の導入により期待される経済性効果について説明する。続いて燃料の濃縮度の現状として、濃縮度に対する我が国固有の安全規制、国際間で共通の規制と、燃料サイクルインフラの状況について述べる。これらを踏まえ、濃縮度 5wt%超燃料を導入する際の課題についてまとめる。なお、詳細な経済性評価については第 5 にて述べるため、本章では一般論について概説するに留める。

2.2.1 濃縮度と燃料サイクルコスト

燃料のウラン濃縮度と燃料サイクルコストの一般的な相関について示すため、国内 PWR 炉心を対象に燃料濃縮度と炉心の運転サイクル長および取出燃焼度等の相関を簡易ツール^aにて評価した。評価に用いた簡易ツールは、燃料バッチ毎の反応度変化を関数式で近似し、炉心平均の反応度、取替バッチ数、サイクル長、取出燃焼度等を簡便に評価するものであり、原子燃料の仕様決定や燃料運用の検討に一般的に用いられているものである。このとき、一般的な燃料運用方式である 3 バッチ運用（炉内の燃料の 1/3 ずつサイクル毎に新燃料に取り換える運用）^bに固定した。評価結果を図 2.1 に示す。図 2.1 より、新燃料取替体数が一定の場合、濃縮度が高くなるほど運転サイクル長は伸長し、取出燃焼度も増加することがわかる。

次に、濃縮度と燃料サイクルコストの相関を図 2.2 に示す。ここでも図 2.1 と同様に 3 バッチ運用に固定した。また、濃縮度が増加することに伴う採鉱費、濃縮費等の増加も考慮した。図 2.2 より、濃縮度が増加するほど燃料サイクルコストは低減、すなわち改善することがわかる。

図 2.1 および 2.2 より、現在検討が進められている高燃焼度化（例えば燃焼度 70 GWd/t 以上）を実現する際には、濃縮度は 5wt%を超え、6－7 wt%程度になることがわかる。同様の検討例はいくつかあり、現行炉心での運用を前提とした場合には取出燃焼度 65－70 GWd/t 程度が経済性の最適点であり、その場合は濃縮度が 5wt%を超えとの報告がなされている¹⁻³⁾。

以上より、原子燃料サイクルコストの低減には濃縮度の向上が有効であり、濃縮度 5wt%を超える燃料の実用化が必要であるといえる。

2.2.2 濃縮度に関する規制

前節において原子燃料サイクルコストの低減には濃縮度 5wt%を超える燃料の実用化が必要であることを述べた。本節では次に、濃縮度 5wt%超燃料を導入するにあたり、

^a 詳細は 5.2.4 節参照。

^b 全集合体数/新燃料取替体数をバッチ数と呼ぶ。炉内の燃料を 1/3 ずつ新燃料に取り替える場合は 3 バッチとなる。

ウラン濃縮度に関する国内外の規制の現状について述べる。

4) 我が国の安全規制

a) 法令

我が国における原子力安全規制の基本的法令としては、「原子力基本法⁴⁾」と「核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律⁵⁾」(以下「原子炉等規制法」と略す)がある。

「原子力基本法」は日本の原子力に関する最も基本的な法律であり、原子力利用の基本方針、「原子力」・「原子炉」等の用語の定義、核燃料物質や原子炉の管理などが定められているが、ウラン濃縮度についての記載は特にない。

「原子炉等規制法」においては製錬、加工、原子炉の設置・運転等、貯蔵、再処理、廃棄といった事業別の規定が中心をなしており、さらに核燃料物質ならびに国際規制物資の使用に関する規制等が記されている。ウランの濃縮度については、第二条5項に「ウラン二三三、ウラン二三五のウラン二三八に対する比率が天然の混合率を超えるウラン」と示されているのみで、5wt%を制限とする記載は特にない。

b) 規則・指針

核燃料物質の加工に関する規制としては、規制官庁（一次審査側）が制定した規則と原子力安全委員会（二次審査側）⁶⁾が決定した安全審査指針とがある。

「核燃料物質の加工の事業に関する規則⁶⁾」(以下「加工規則」と略す)においては、第七条の九の防護措置の規定において、ウラン濃縮度毎に必要な措置が記載されている。これによると、ウラン濃縮度については20 wt%以上、20wt%未満－10 wt%以上、10 wt%未満－天然濃度を超えるものの三種に区分されており、5wt%を超えても10 wt%未満であれば取り扱いに差はない。

「加工施設の設計および工事の方法の技術基準に関する規則⁷⁾」(以下「技術基準規則」と略す)では、加工施設における事故時対応設備について第三条第2項に規定されている。これによれば、『臨界質量以上のウラン（ウラン235の濃縮度5%を超えるものに限る）またはプルトニウムを取り扱う核燃料加工施設は、臨界警報設備の設置および臨界事故の発生を想定した適切な措置を講じなければならない』と規定されており、濃縮度5wt%を超えると規制要件が異なっている。

「核燃料施設安全審査基本指針⁸⁾」(以下「基本指針」と略す)は各種の核燃料施設（原子炉等規制法で指定された加工施設、再処理施設、使用施設等）に共通した安全審査上の基本的考え方をとりまとめたものである。基本指針においては、濃縮度に関する制限は特に規定されていない。また、「ウラン加工施設安全審査指針⁹⁾」(以下「加工指針」

⁶⁾ ただし、原子力安全委員会および原子力安全・保安院は、2012年6月20日に成立した「原子力規制委員会設置法案」に基づき、同年9月19日付で原子力規制委員会およびその事務局としての原子力規制庁に移管・統合された。

と略す)は基本指針に準拠し、ウラン加工施設に対する安全審査上の指針をとりまとめたものである。加工指針においては濃縮度は 5wt%以下に限定されており、如何なる場合においても臨界に達しないよう管理することにより、臨界事故に対する考慮は不要とされている。

一方、「特定のウラン加工施設のための安全審査指針¹⁰⁾」(以下「特定加工指針」と略す)は、1999年9月30日に起こった株式会社JCOでの臨界事故を踏まえ、基本指針に基づき、濃縮度が比較的高い「特定の」ウラン加工施設に対する安全審査上の指針をとりまとめたものである。ここでいう「特定」とは、原子炉等規制法に基づく加工の事業の許可(変更の許可を含む)の申請に係る加工施設であって、「濃縮度5%を超え20%未満のウランを転換、加工する施設」を指している。

特定加工指針における臨界事故の考え方は「指針3. 事故時条件」において、「事故の発生の可能性を技術的観点から十分に検討し、最悪の場合、技術的にみて発生が想定される事故であって、一般公衆の放射線被曝の観点からみて重要と考えられる事故」の候補として、「ウランによる臨界」を含んでいる点が前述の加工指針との相違である。さらに、想定される事故について「臨界の検出および未臨界にするための措置」について「十分に検討」し、「一般公衆に対して最大の放射線被曝を及ぼす事故を最大想定事故として設定し、一般公衆の線量を計算し、一般公衆に対し、過度の放射線被曝を及ぼさないよう離隔が確保されることを確認すること。」と規定している。

加えて「指針12.臨界事故に対する考慮」ではさらに明確に「万一の臨界事故を想定し、これに対する適切な対策が講じられていること。このため、(1)特定のウラン加工施設は、臨界警報装置の設置その他の臨界事故の発生を想定した適切な措置(臨界及びその継続性の検知)が講じられる設計であること。(2)指針3で臨界事故の発生が想定される施設において臨界事故が発生したとしても、これを未臨界にするための措置が講じられる設計であること。」と規定している。

特定加工指針ではその「まえがき」にて「事業者の申請内容が本指針に適合しない場合があったとしても、それが技術的な改良、進歩等を反映して、本指針が満足される場合と同等の安全性を確保し得ると判断される場合、これを排除するものではない」と明記されている。しかしながら、この特定加工指針における臨界事故に関する規定が、特に国内において濃縮度5wt%を超える際の非常に大きな物理的かつ心理的な障壁になっていると考えられる。

5) 国際間の安全規制

a) 核物質防護

核物質防護に関しては、「核物質および原子力施設の防護に関する勧告¹¹⁾」(1975年初版, 2011年改訂5)が国際原子力機関(IAEA)からガイドラインとして示されている。これを踏まえ、国際間の核物質輸送に関しては「核物質の防護に関する条約¹²⁾」(以

下「核物質防護条約」と略す)が締結されている。ウラン濃縮度の区分について、核物質防護条約の附属書(II)を表 2.1 に示すが、これは上記 IAEA の勧告における区分と同様である。

これによると、核物質防護上は濃縮度 10 wt%未満であれば 5wt%を超えても取扱いと同じであり、5wt%以下と特段変更はないことがわかる。

b) 保障措置

「核兵器の不拡散に関する条約¹³⁾」(Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons : NPT)では、核兵器保有国以外への核兵器の拡散を防止するとともに、原子力の平和的利用技術の軍事技術への転用を防止するため、非核兵器保有国が国際原子力機関(IAEA)の保障措置を受諾する義務を規定している。保障措置の目的は、有意量^{d)}の核物質が核兵器その他の核爆発装置の製造のため又は不明な目的のために転用されることを阻止することであり、ここでいう有意量とその探知時間^{e)}はそれぞれ表 2.2 および表 2.3 のように規定されている¹⁴⁾。核不拡散上は濃縮度 20 wt%を境に有意量および探知時間が異なるが、それ以下であれば濃縮度 5wt%を超えても差違はない。

c) 二国間協定

我が国は米国、英国、カナダ、豪州、フランス、中国、欧州原子力共同体(ユーラトム)、カザフスタン、韓国、ベトナム、ヨルダン及びロシアとの間で原子力協定を締結しており^{f)}、現在さらにトルコやインド、アラブ首長国連邦(UAE)等とも交渉中である。

このうち、日米間の二国間協定「原子力の平和的利用に関する協力のための日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定¹⁵⁾」におけるウラン 235 濃縮度についての記載は、「この協定にもとづいて受領された核物質等を貯蔵、管轄外移転、再処理・形状内容の変更または濃縮(20 %以上)する際には、両国政府の事前の合意を要する」および第 6 条で「ウランは、同位元素ウラン 235 の濃縮度が 20 パーセント未満である範囲で濃縮することができるものとし、また、両当事国政府が合意する場合には、同位元素ウラン 235 の濃縮度が 20 パーセント以上になるように濃縮することができる。」の箇所のみである。また、「付表 核物質の区分」として表 2.1 と同様の表が添付されている。これは日米間以外の他国との協定においても基本的に同様である。

このように、二国間協定においては濃縮度 20 wt%で区別はあるものの、濃縮度 5wt%を境として扱いに差違はない。

^{d)} 関連する転換工程を全て考慮しても核爆発の可能性を排除し得ない核物質のおおよその量。

^{e)} 実際の転用があってから IAEA の保障措置によってそれが探知されるまでの時間の最大値。

^{f)} 外務省ホームページ (<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/atom/topics/jyovaku.html>) の平成 24 年 9 月付文書より。

6) 輸送に関する規制

核燃料物質の輸送に係る安全規制については、国際原子力機関（IAEA）が定めた「放射性物質安全輸送規則」（IAEA 輸送規則）があり、わが国でもこれを都度取り入れて関係する規則（例えば「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」）等の改正が行われている¹⁶⁾。これによると、核燃料輸送物（以下「輸送物」と略す）は収納物の放射能限度および物質の制限に従って区分される^{g)}のみで、濃縮度 5wt%を境として扱いに差はない。

一方、輸送物は輸送中に温度変化や振動など外的な要因により破損しないことが要求されるとともに、核物質防護のための必要な措置を講ずることが定められている。核物質防護の観点からすれば、前節で述べたように濃縮度は 10 wt%未満であれば 5wt%を超過しても同等の取扱いが可能である。

2.2.3 燃料サイクルインフラ

我が国の国内においては全ての燃料サイクルのインフラ（濃縮、再転換、成型加工、輸送、新燃料貯蔵プールなど）は一部の使用許可施設を除き、全て濃縮度 5wt%以下を前提に設計され、許認可を取得している。

一方、海外においてもほとんどの商業用原子炉関連施設は濃縮度 5wt%以下で許認可を受けている。しかしながら、一部の施設においては、既に 5wt%超の許認可を取得、あるいは設計上は 5wt%超に対応したものがある。本節ではこれら海外燃料インフラにおける濃縮度 5wt%超の現状について述べる。

1) 濃縮・再転換・成型加工施設

海外では新興国を中心とした今後の原子燃料の需要増加を見据え、幾つかの濃縮施設の新増設による供給能力の向上が進んでいる。このうち、USEC は遠心分離法による新型濃縮プラント American Centrifuge Plant (ACP) の濃縮度制限を 10 wt%として規制当局に申請し、既に認可を取得している^{h)}。URENCO や AREVA が操業するガス拡散濃縮施設では、現在濃縮度は 5wt%以下に制限されているが、再許認可を取りさえすれば濃縮度増加は可能である。また、現在両社とも濃縮度制限を 7 wt%まで上げた遠心分離法の新型施設の建設を検討しており、実現は市場の要求次第である。この他、ロシア Yekaterinburg のガス拡散濃縮施設、米国 GE 日立的のレーザー濃縮施設ⁱ⁾も既に 5wt%超の許可を得ている。

再転換・成型加工施設については、世界の商業加工施設のうちロシア TVEL の

^{g)} 主に A 型、B 型、C 型に分けられる。また、原子炉等規制法では、A 型の中で、輸送物の表面の放射線量が低く、同時に収納物の放射エネルギーが少ない輸送物を特に L 型と呼んでいるが、これは我が国独自の輸送区分名称である。

^{h)} 2009 年に操業開始、2010 年には全稼働の予定であったが、政府からの資金融資を巡って 2012 年時点においても工程が遅れている。

ⁱ⁾ 2012 年 9 月に NRC から許認可を取得したが、レーザー濃縮法の経済合理性については疑問視する見方もある。

Elektrostal 工場のみが現時点で濃縮度 5%超の許認可を取得している。一方、AREVA と GNF-A に導入された新しい乾式転換設備は、設計上は 5wt%超に対応可能であるが、許認可上は 5wt%までとなっている。AREVA が拡張を予定している仏国の Romans 工場についても、設計上は濃縮度 5wt%超燃料を扱えるようになっている。このような施設では、改めて許認可を取得し直すのみで特段の設備改造なしに濃縮度制限の増加が可能であると考えられる。

2) 許認可の状況

米国燃料事業者に対する直接および間接の聞き取り調査によると、米国では濃縮度 5wt%以下から超過になることで規制に特段の差はなく、規制当局から要求されるのは施設の安全性が保証されることを解析し、設計することだけである。

当初、濃縮度 5wt%を超える燃料については、設計評価に必要な核特性実測データおよび設計コードの妥当性確認データが十分でないとの指摘もあった^jが、これも既に USEC など 5wt%超の制限が認可されている現状を鑑みれば、既存データにより対応できたと考えられる。ただ、燃焼に伴う燃料の組成変化を考慮するような燃焼燃料の臨界性については、燃焼計算における設計ツールやデータの妥当性を示す必要があり、データの拡充など規制当局からの要求事項が増えることが予想される。

以上より、規制に差異のある日本国内に比べ、米国では濃縮や成型加工に関しては比較的認可の取得は容易であると考えられる。

3) 輸送

濃縮度 5wt%超燃料が市場に流通していないため、商用の 5wt%超燃料の輸送を目的として許認可を取得した輸送容器は現時点では存在していない。濃縮度 5wt%超燃料のフロントエンド側の輸送については、①濃縮施設から再転換施設への UF₆ の輸送、②再転換施設から成型加工施設へのウラン燃料粉末の輸送（再転換施設と成型加工施設が同一敷地内にない場合）、③成型加工施設から原子炉への燃料集合体の輸送、の 3 つの側面について再許認可が必要となる。

このうち、①における UF₆ は金属製シリンダ内で結晶固体として輸送されるが、シリンダに亀裂損傷が生じると空気中の水蒸気と反応し放射性の高腐食性のガスとなり、しかも容易に飛散していく。このような UF₆ の物性的活性度が非常に高いことに起因して容器の健全性が厳しく要求されるため、再許認可のコストはかなり高くなることが予想される。

一方、水密構造により水分管理がされる事を前提とすれば UF₆ の輸送容器は臨界上の余裕は比較的大きく、濃縮度が 5wt%を超えても特に問題にはならない。輸送の規制に

^j NRC が 2004 年 12 月に示したイニシアティブ ”Statement of Work NRC-02-05-004: Identification of Significant Nuclear Criticality Safety Issues Associated with Processing Uranium Enriched Up To Ten Weight Percent” にて、5～10wt%に対してコードの妥当性を示すための臨界実験データの拡充を求めている。

関しては既に示したとおり、核物質防護上の制約はあるものの濃縮度 10 wt%以下であれば特段取り扱いの差違はない。

UO₂ ウラン粉末や燃料集合体については、輸送の関しては濃縮度 10 wt%以下であれば特段取り扱いの差違はないが、反応度が増加することに対する輸送容器の臨界安全上の評価は必要である。

以上より、臨界安全の観点からは濃縮度 5wt%超燃料の輸送に対する規制上の課題は特に無く、臨界安全上の課題解決を主眼とする本論文ではこれ以上は議論しないこととする。

なお、使用済み燃料の輸送に関しては濃縮度増加よりも、高燃焼度化に伴う熱や放射線強度の増加が懸案となるが、本論文では濃縮度に関する課題解決を目的とするため、これも本研究の対象からは除外し、今後の課題とする。

2.2.4 濃縮度向上に関する現状と課題

以上より、濃縮度向上に関する国内外における規制の現状と、供給インフラの状況について下記にまとめる。

- ・ 濃縮度が 5wt%を超過する際、日本国内で規制上の取扱が異なるのは再転換および加工施設のみである。その他の核物質防護や二国間協定などの規制上は、10 あるいは 20wt%以下であれば 5wt%を超過しても同等の扱いである。
- ・ 輸送については、臨界安全の課題は少ないと考えられる。なお、使用済み燃料の輸送に関しても臨界安全上の課題より、高燃焼度化に伴う熱や放射線強度の増加が懸案となる。
- ・ 特定加工指針では、万一の臨界事故を想定し、これに対する適切な対策を講じることを要求されている。これには大幅な設備改造や設計変更が伴うことが想定され、多大な設備投資が必要となる可能性が高い。これが国内において濃縮度 5wt%を超える際の非常に大きな物理的かつ心理的な障壁になっていると考えられる。
- ・ 一方、濃縮度 5wt%に対して規制上特に制約のない米国では既に濃縮度 5wt%を超過する申請を出している施設や設計上 5wt%超に対応している施設など、5wt%を超えるインフラが整備されつつある。濃縮度 5wt%超燃料の供給自体は、市場のニーズ次第で比較的容易に実現可能であると考えられる。

2.3 濃縮度向上の課題に対する解決策

前節で述べたとおり、日本国内で濃縮度 5wt%超燃料を導入する際の主な課題は、大幅な設備変更、許認可対応とそれに伴う投資である。これに対し、これら課題を解決する有効な施策として、本研究では『エルビアクレジット』の概念を提案する。以下、こ

のエルビアクレジットについて述べる。

2.3.1 エルビアクレジット

濃縮度 5wt%を超える燃料について再転換後全てのウラン燃料粉末に低濃度の中性子吸収材（エルビア； Er_2O_3 ）を混入し，濃縮度 5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保できれば，それ以降の輸送や成型加工施設における臨界安全に関する影響を解消あるいは軽減できるものと考えられる¹⁷⁾。このようなウラン燃料粉末全量に中性子吸収材としてエルビアを混入して反応度上のクレジットを得る概念を『エルビアクレジット』と称している。

このようなクレジットに使用する中性子吸収材としては，既に国内外の商業用原子炉にて中性子吸収材として使用実績のあるエルビアまたはガドリニアが候補として考えられるが，ここで求められる要件としては，

- ・ 濃縮度 5wt%を超える全てのウラン粉末に毒物を混入させること。
- ・ 燃料の燃焼を通じて濃縮度 5wt%の燃料と等価またはそれ以下の反応度に抑制すること。
- ・ 原子炉用燃料として炉心特性を満足させる核的挙動を示すこと。

が挙げられる。上記の観点からクレジット用の物質としてのエルビアとガドリニアを比較した。計算結果を図 2.3 に示す。

図 2.3 は炉心内を模擬した無限集合体体系において，濃縮度 6wt%のウラン燃料集合体全体に 0.2%^kのエルビアまたはガドリニアを燃料内に均一に混入させた際の計算結果である。図には併せて濃縮度 4.95wt%^lの燃料の計算結果も示している。図 2.3 より，0.2wt%程度のエルビアの混入により，実際の濃縮度は 6wt%の燃料に対して，濃縮度 5wt%燃料の反応度よりも低くできることがわかる。なお，ここで得られた結果はあくまでも無限集合体体系での結果であり，あらゆるスペクトル条件でも濃縮度 5wt%燃料の反応度と同等以下にするための必要十分なエルビア濃度については，第 4 章にて詳細に検討する。

図 2.3 より下記の点でエルビアの方が好ましいと言える。

- ・ ガドリニアを全ての燃料に混入した場合には，例え極微量（0.2wt%程度）でも初期反応度を過度に抑制してしまい，初期の炉心反応度が低くなりすぎる。
- ・ ガドリニアの場合，燃焼に伴う反応度変化が非常に急峻となり，燃焼途中で濃縮度 5wt%燃料の反応度よりも高い反応度となる可能性がある。また，このような急激な反応度変化が生じると炉心内の出力分布の平坦化が難しい。

^k ここで毒物濃度 0.2wt%は，現行の製造技術において毒物の濃度や均一性を実用規模で担保できる濃度の下限として設定した便宜上の値であり，実際に必要となる毒物濃度は第 4 章にて検討している。

^l 製造公差 0.05wt%を考慮すると，現行の濃縮度 5wt%制限下での現実的な最高濃縮度の値。

- ・ 一方、エルビアを燃料棒に微量（0.2wt%程度）混入した場合は、初期反応度を過度に抑制することなく燃焼特性も緩やかになる。初期反応度低下量は適切であり、かつ、炉心内の出力分布の平坦化も容易である。

これらの特徴は、エルビアの中性子吸収断面積がガドリニアに比べて小さく、燃焼中の反応度変化も緩やかであるためである。

ガドリニアで初期の反応度を増加させるには、混入させるガドリニアの濃度を 0.2 wt%よりも下げる必要があり、実際そのような研究例も報告されている¹⁸⁾。しかしながら、均一性や濃度管理の観点から現状の加工プロセスでは難しい。また、仮にそれが可能であったとしても、より低いガドリニア濃度の場合は燃焼途中に濃縮度 5wt%燃料の反応度よりも高い反応度となることは避けられない。そのような燃料は燃焼初期に何らかのトラブルや不具合が起こった際に既存の 5wt%以下の反応度で臨界管理されている施設や設備では取り扱いできないこととなり、導入するためには課題が多い。

以上の考察より、本研究では毒物としてエルビアを選択した『エルビアクレジット』およびこれを用いた『エルビアクレジット燃料』を研究の対象としている。

2.3.2 エルビアクレジットの効果

エルビアクレジットの適用により、現状通りの設備設計のままで臨界安全性を担保することが可能となるため、大幅な設備変更・設備投資が不要となることが期待できる。さらに、エルビアクレジットを適用しない場合と比較して、取扱量（単位輸送容器の輸送量、加工施設における加工量、貯蔵庫における貯蔵量など）を増加させることができるので、作業効率・輸送効率・貯蔵効率の向上を図ることができる。

既に示したとおり、特定加工指針の指針 12 においては、臨界事故に対する考慮として、1)臨界の検知装置の設置、2)未臨界にするための措置、が必要とされている。このうち、1)は想定事故に選定されるか否かに係わらず適切な措置（臨界及びその継続性の検知）を採ることとされているのに対し、2)に関しては臨界事故が指針 3 に則って想定事故に選定された施設にのみ要求される。即ち、そもそも臨界事故が最大想定事故でなければ臨界の検知装置の設置や周辺被曝評価は不要であるが、過去に臨界事故が濃縮度 7wt%程度で発生している事実¹⁹⁾を踏まえ、万が一の事態に備えて未臨界にするための措置が要求されている。

またさらに、特定加工指針ではその「まえがき」にて「事業者の申請内容が本指針に適合しない場合があったとしても、それが技術的な改良、進歩等を反映して、本指針が満足される場合と同等の安全性を確保し得ると判断される場合、これを排除するものではない」と明記されている。

従って、指針の「解説」にあるとおり「臨界事故の発生の可能性に関し、事故の評価を要しない程に低くする手段を予め講ずる」ことおよび「まえがき」にあるように「技術的な改良、進歩等を反映して、本指針が満足される場合と同等の安全性を確保する」

ことが合理的に説明できれば、特定加工指針の要求に対して柔軟に対処することが可能となる。エルビアクレジットはまさにこの主旨に則って、濃縮度 5wt%超燃料導入に対する負荷の低減を企図している。

なお、エルビアクレジットは主にフロントエンドにおける臨界安全性の向上を目的としたものである。高燃焼度化に伴う遮蔽・熱への対応など、エルビアの有無に関わらず元々存在しているバックエンド側の課題を解決するものではないことを注記しておく。

バックエンドにおける臨界安全性に関しては、現状多くの施設において安全側に未燃焼新燃料の状態を仮定している。が、今後は燃焼による反応度低下(燃焼度クレジット)が認められる方向であり、その際は未燃焼時の初期濃縮度が 5wt%を超過すること自体は問題ではなくなる。

また、使用済燃料の臨界安全性評価に際し、安全側に中性子吸収材が全く存在しない状態を仮定するのではなく、中性子吸収材による反応度低下を考慮し、燃料の寿命中の実質的な最大反応度で臨界安全性を担保する手法もガドリニア入り燃料では認められつつある(ガドリニアクレジット)。エルビアクレジットは同様の目的にも適用可能ではあるが、この場合は特定の燃料棒のみに毒物を混入させればよく、必ずしも燃料全体に毒物を混入させる必要はない。

2.3.3 エルビア供給シナリオ

エルビアは希土類金属の一種である。希土類は当初希少鉱物から発見されたため「希少(レア)」と命名されたが、埋蔵量自体は多く比較的安価に入手可能である。ただし、近年は希土類の利用用途が広まり、供給の寡占化や価格高騰が懸念されている。参考までに、希土類の地域別の埋蔵量²⁰⁾を表 2.5 に、産出量の推移²¹⁾を図 2.4 に示す。

また、各希土類元素の典型的な価格と含有率²²⁾を図 2.5、図 2.6 にそれぞれ示す。これらより、

- ・ 希土類の中でもルテチウム(Lu)やツリウム(Tm)は高価であるが、エルビウムはガドリニウム(Gd)やディスプロシウム(Dy)と同程度の価格である。
- ・ 含有率については希土類鉱石の種類によって多少異なるが、エルビウムはガドリニウムと同程度である。

といえる。エルビアは中国、ロシア、米国、欧州の様々な化学メーカーから商業規模で供給され、原子力業界以外でも広く用いられている工業用原料であり、入手は比較的容易である^m。価格は原料、純度、購入量によって決まるが、原子炉では 99.99%以上の高純度エルビアが使われる。

^m 近年は世界的に希土類の需要が増大したことに加え、中国政府の輸出制限により希土類全体の価格が上昇傾向にあったが、各国政府の中国依存からの脱却政策が進み、再び価格は下降安定傾向に戻っている。

次に、エルビアクレジット燃料の供給シナリオについて、燃料粉末へのエルビア混入施設の観点から以下に検討する。供給シナリオの検討において、エルビアクレジット燃料の優位性を高めるための重要なポイントは燃料サイクルの出来るだけ早い時点でエルビアを混入させることである。考え得るオプションとして、以下の3つがある。

オプション1：既存の再転換工場にエルビア混入工程を追加する。

オプション2：濃縮工場敷地内に再転換およびエルビア混入施設を新規に併設する。

オプション3：濃縮工場とは別にエルビア燃料専用の再転換およびエルビア混入施設を新規に建設する。

オプション1では既存の再転換工場の濃縮度制限を向上させ、エルビアを混入させる工程を追加するものである。既に設計上は5wt%超に対応している施設では、比較的小さな投資でエルビア混入施設の実現が可能であると考えられる一方、燃料サイクルインフラにおけるエルビアクレジットの影響範囲は限定的なオプションである。

オプション2では濃縮後、同敷地内で再転換を行い、エルビアを混入する。この場合、UF₆の輸送が不要となり、かつ、濃縮再転換工場出荷後は既存の輸送容器で成型加工メーカーに燃料粉末を輸送できる。UF₆シリンダの再許認可にはかなりのコストが見込まれるが、オプション1ではこの問題が無く、当濃縮再転換施設以降の設備改造や再許認可が最低限で済み、最も広くエルビアクレジットの恩恵に預かることができるオプションである。既に海外の幾つかの濃縮工場では濃縮度5wt%超の許認可を取得済みあるいは取得予定であり、これらの濃縮事業者と協力し、製品の差別化と商業機会の拡大を図ることがオプション1の実現シナリオである。

オプション3ではエルビア燃料専用再転換工場を新規に建設する。濃縮後、当専用再転換工場にUF₆を輸送し、再転換後エルビアを混入し、各加工施設に燃料粉末を輸送する。UF₆輸送の問題は残るものの、専用再転換工場出荷後は設備改造等が最低限で済む。しかしながら新規の工場設立は大きな初期投資と長いリードタイムが必要な高リスクの経営課題となる。このため、リスク分散とスケールメリット向上のために複数の加工工場向けに複数の濃縮工場からの燃料粉末を処理することが有効である。

我が国においては、将来的には青森県六ヶ所村に建設されている濃縮工場の濃縮度制限を5wt%超に向上させ、同一敷地内に再転換施設を併設するオプション（オプション2）が有効である。この場合、特定加工指針の適用を受けるのは六ヶ所村工場構内のみに限定され、再転換後のウラン燃料粉末の輸送以降は、エルビアクレジットの適用により既存の国内インフラを最大限活用できることが期待できる。

一方、六ヶ所村濃縮工場のみでは国内需要をまかないきれないこと、および現在でも国内需要の大半を海外で再転換している現状を鑑みれば、濃縮度5wt%超燃料に対する規制がさほど厳しくなく、既に実現化しつつある海外施設にて再転換後エルビアを混入し、国内の燃料インフラに対してはエルビアクレジットによって設備改造を不要とする

シナリオ（オプション 1）をまずは実現させることが現実的である。

このようにエルビアクレジットを活用し、国内外の濃縮・再転換・加工プロセスのベストミックスを検討しつつ、新規インフラの合理的導入と既存インフラの有効活用を図ることが重要であると考えられる。

2.4 まとめ

原子力発電所における使用済燃料の発生量抑制のため、燃料の濃縮度を 5wt%超に上昇させた高濃縮度燃料について、特にフロントエンド側に着目し、国内外の規制や海外の動向などについて述べた。また、濃縮度 5wt%超燃料実現のための有効な手段として、『エルビアクレジット燃料』を提案し、その概念と効果、供給可能性などについて検討した。

その結果、濃縮度が 5wt%を超過する際、日本国内で規制上の取扱が異なるのは再転換および加工施設のみであり、その他の規制（核物質防護、輸送、核不拡散など）は、10wt%以下であれば 5wt%を超過しても同等の扱いであることがわかった。

また、加工施設については、エルビアクレジットにより特定加工指針の要求を緩和することにより、既存の設備改造が不要となり生産性の向上による経済的メリットも期待できることがわかった。

さらに、エルビアクレジット燃料の供給オプションについては、国内外のベストミックスを目指しつつ、新規インフラの合理的導入と既存インフラの有効活用を図ることの重要性を指摘した。

エルビアクレジットを実用化するためには、エルビア入り燃料の核特性や物性データの蓄積をはじめ、未臨界性を担保するための必要十分なエルビア量算出方法の提示など、様々な技術課題がある。次章からこれら技術課題の解決について述べる。

表 2.1 核物質の区分表

核物質	形態	第 1 群	第 2 群	第 3 群(注 c)
プルトニウム (注 a)	未照射(注 b)	2 キログラム以上	500 グラムを超え 2 キログラム未満	15 グラムを超え 500 グラム以下
ウラン 235	未照射(注 b) ウラン 235 の濃度が 20%以上のウラン	5 キログラム以上	1 キログラムを超え 5 キログラム未満	15 グラムを超え 1 キログラム以下
	未照射(注 b) ウラン 235 の濃度が 10%以上 20%未満のウラン	/	10 キログラム以上	1 キログラムを超え 10 キログラム未満
	未照射(注 b) ウラン 235 の濃度が天然ウラン における混合率を超え 10%未満 のウラン	/	/	10 キログラム以上
ウラン 233	未照射(注 b)	2 キログラム以上	500 グラムを超え 2 キログラム未満	15 グラムを超え 500 グラム以下
照射済燃料		/	劣化ウラン，天然 ウラン，トリウム 又は低濃縮燃料 (核分裂性成分 含有率 10%未満) (注 d,e)	/

注 a 全てのプルトニウム（プルトニウム 238 の同位体濃度が 80%を超えるプルトニウムを除く。）

注 b 原子炉内で照射されていない核物質，又は原子炉内で照射された核物質であつて遮蔽がない場合にこの核物質からの放射線量率が 1 メートル離れた地点で 1 時間当たり 100 ラド以下であるもの

注 c 第 3 群に掲げる量未満のものおよび天然ウランは，管理についての慎重な慣行に従つて防護するものとする。

注 d 第 2 群についての防護の水準が望ましいが，いずれの国も，具体的な状況についての評価に基づき，これと異なる区分の防護の水準を指定することができる。

注 e 他の燃料であつて，当初の核分裂性成分含有量により，照射前に第 1 群又は第 2 群に分類されているものについては，遮蔽がない場合にその燃料からの放射線量率が 1 メートル離れた地点で 1 時間当たり 100 ラドを超える間は，防護の水準を 1 群下げることができる。

（「核物質の防護に関する条約」の「附属書 II」を転載）

表 2.2 規制対象核物質とその有意量

	物質	有意量
直接利用核物質	プルトニウム	8kg Pu
	ウラン 233	8kg ²³³ U
	ウラン（濃縮度 20%以上）	25kg ²³⁵ U
非直接利用核物質	ウラン（濃縮度 20%未満。 天然，劣化ウラン含む）	75kg （または天然ウラン 10t，劣化 ウラン 20t）
	トリウム	20t Th

（“IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition”より抄訳）

表 2.3 規制対象核物質とその探知時間

規制対象核物質	探知時間
高濃縮ウラン*, プルトニウムまたは ^{233}U 金属	7-10 日
高濃縮ウラン*, プルトニウムまたはその混合酸化物を含有する未照射核物質	1-3 週間
高濃縮ウラン*, プルトニウムまたは ^{233}U を含有する照射済み核物質	1-3 ヶ月
劣化ウラン, 天然ウラン, 低濃縮ウランまたはトリウム	3-12 ヶ月

*) ^{235}U and/or ^{233}U を 20%以上含有するウラン

(“IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition”より抄訳)

表 2.5 (a) 希土類の確認埋蔵量と可採埋蔵量¹

(希土類酸化物重量 単位:トン)

国	Reserves ²	% Total	Reserve base ³	%Total
米国	13,000,000	15	14,000,000	9
オーストラリア	5,200,000	6	5,800,000	4
中国	27,000,000	31	89,000,000	58
独立国家共同体	19,000,000	22	21,000,000	14
インド	1,100,000	1	1,300,000	0.8
マレーシア	30,000	0.03	35,000	0.02
その他	22,000,000	25	23,000,000	15
計	88,000,000		150,000,000	

¹ USGS (米国地質調査所) の 2005 年版レポートより

² Reserves: 確認埋蔵量の内, 経済的に採掘・生産可能な量。可採埋蔵量。

³ Reserve Base: 確認埋蔵量。

表 2.5 (b) 希土類の確認埋蔵量と可採埋蔵量⁴

(希土類酸化物重量 単位:トン)

国	Reserves ⁵	% Total
米国	13,000,000	12
オーストラリア	1,600,000	1
ブラジル	48,000	0.04
中国	55,000,000	50
独立国家共同体	19,000,000	17
インド	3,100,000	3
マレーシア	30,000	0.03
その他	22,000,000	20
計 (概算)	110,000,000	

⁴ USGS (米国地質調査所) の 2012 年版レポートより

⁵ Reserves: 確認埋蔵量の内, 経済的に採掘・生産可能な量。可採埋蔵量。

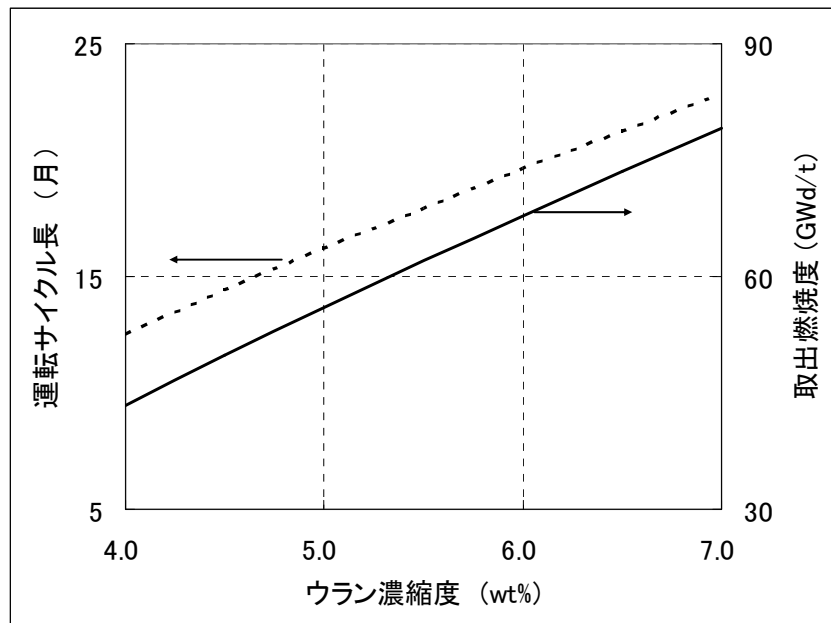


図 2.1 濃縮度と運転サイクル長および取出燃焼度の相関

(国内 PWR にて 3 バッチ運転を仮定した評価例)

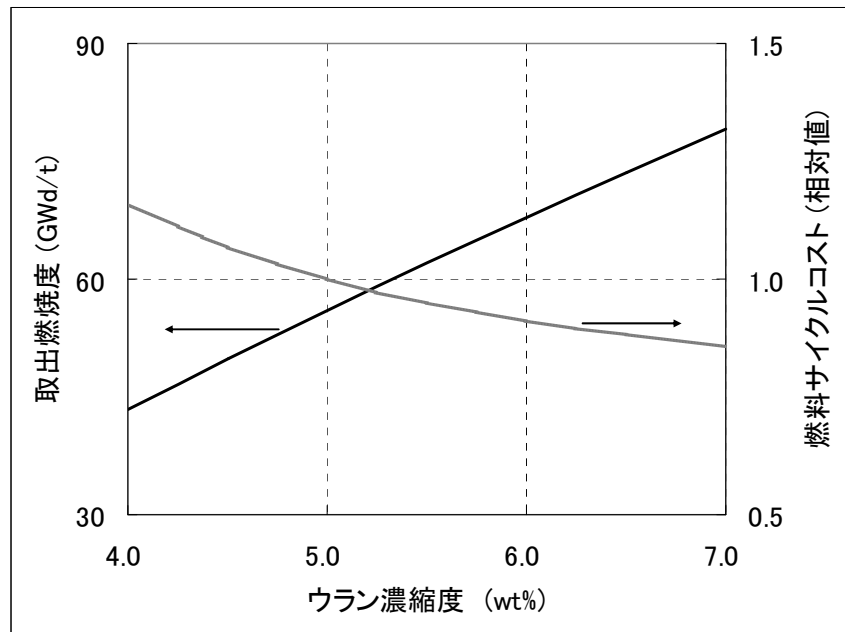


図 2.2 濃縮度と取出燃焼度および燃料サイクルコストの相関

(国内 PWR にて 3 バッチ運転を仮定した評価例)

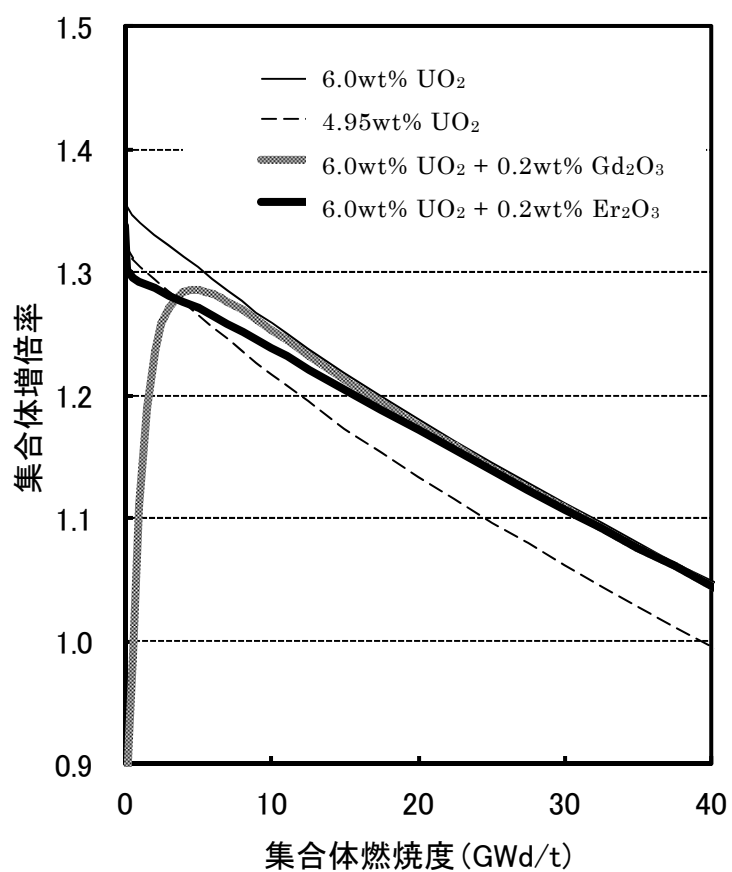


図 2.3 エルビウム入り燃料とガドリニウム入り燃料の燃焼に伴う集合体増倍率の比較

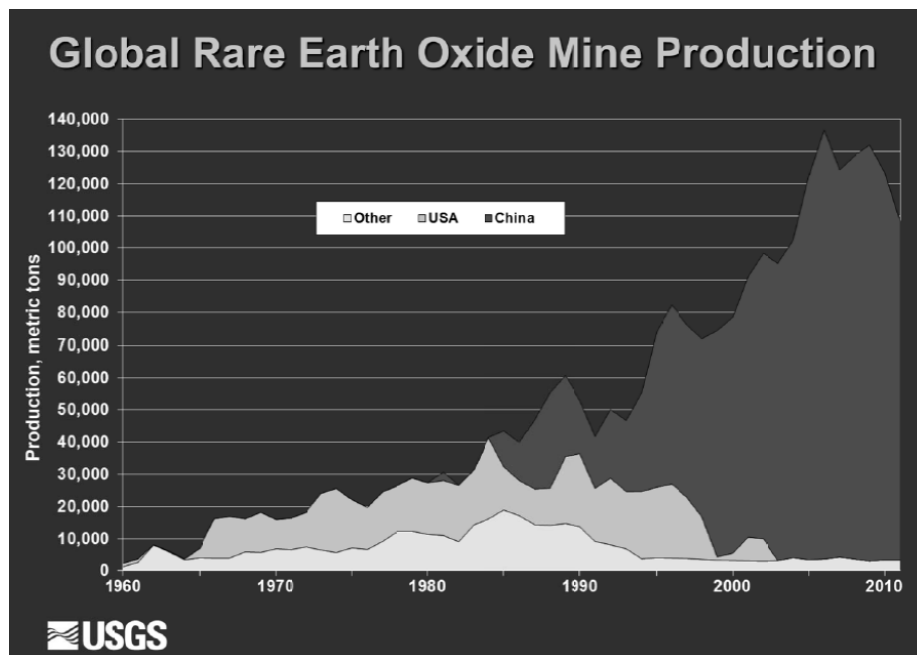


図 2.4 希土類の産出量と地域別内訳
(USGS (米国地質調査所) のホームページより)

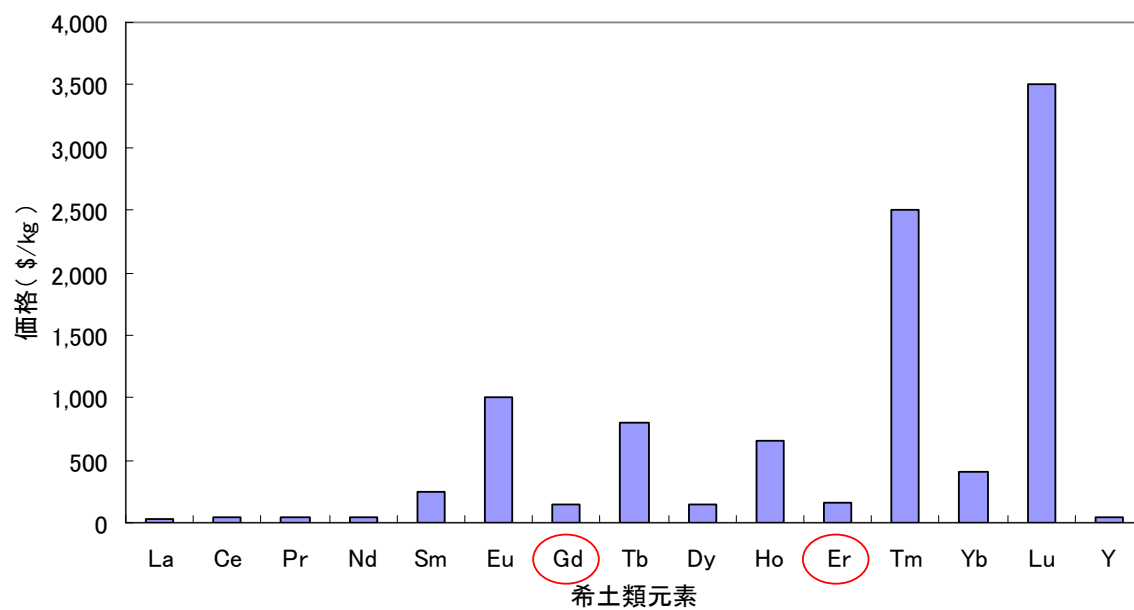


図 2.5 希土類元素の典型的な価格
(USGS (米国地質調査所) の 2006 年版『鉱物資源希土類年鑑』の
数値より筆者が作図)

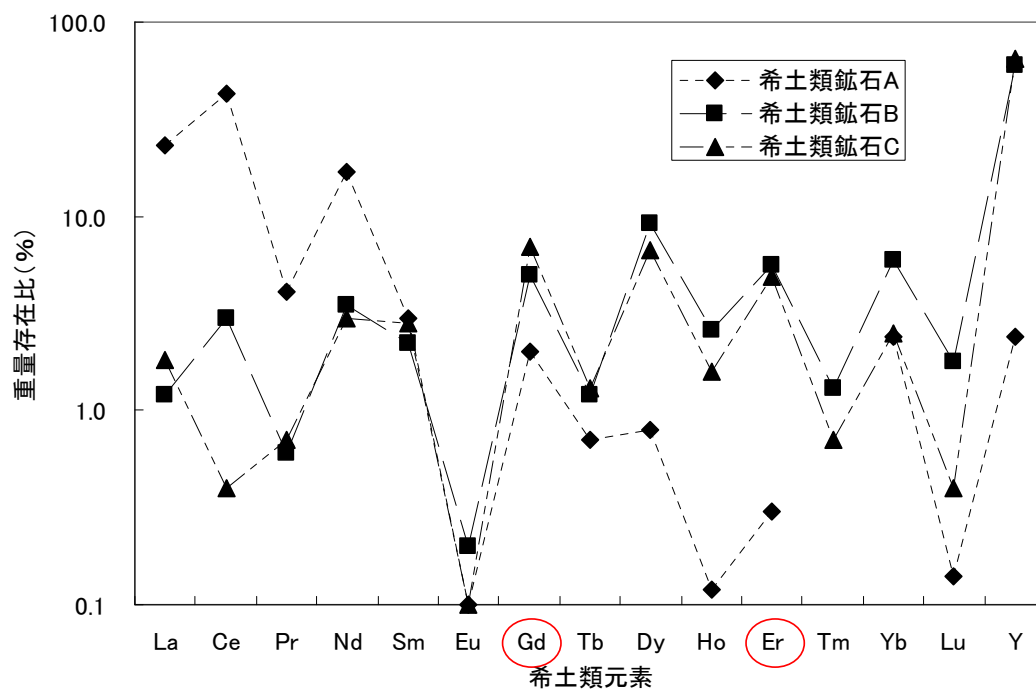


図 2.6 主な希土類鉱石における希土類元素の含有率
 (USGS (米国地質調査所) の 2006 年版『鉱物資源希土類年鑑』の
 数値より筆者が作図)

【第 2 章の参考文献】

- 1) J. R. Secker, O. Ozer, K. Ivanov et al., “Optimum Discharge Burnup and Cycle Length for PWRs,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003), Hilton Head Island, South Carolina, USA, October 5-8, 2003 (2003).
- 2) R. Gregg, A. Worrall, “Effect of Highly Enriched / Highly Burnt UO₂ Fuels on Nuclear Design Parameters and Economics,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management III (ANFM 2003), Hilton Head Island, South Carolina, USA, October 5-8, 2003 (2003).
- 3) T. Yamamoto, Y. Ohga et al., “Development of Next Generation Light Water Reactor in Japan (2),” Proc. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '09), Tokyo, Japan, May 10-14, (2009).
- 4) 「原子力基本法」 (昭和三十年十二月十九日法律第百八十六号)
- 5) 「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」 (昭和三十二年六月十日法律第百六十六号) .
- 6) 「核燃料物質の加工の事業に関する規則」 (昭和四十一年七月十九日総理府令第三十七号) .
- 7) 「加工施設の設計及び工事の方法の技術基準に関する規則」 (昭和六十二年三月二十五日総理府令第十号) .
- 8) 「核燃料施設安全審査基本指針」 (昭和 55 年 2 月 7 日 原子力安全委員会決定) .
- 9) 「ウラン加工施設安全審査指針」 (昭和 55 年 12 月 22 日 原子力安全委員会決定) .
- 10) 「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」 (平成 12 年 9 月 25 日 原子力安全委員会決定) .
- 11) 「核物質および原子力施設の防護に関する勧告 (The Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear facilities)」, INFCIRC/225/Rev.5, (2011).
- 12) 「核物質の防護に関する条約」 (昭和 63 年 11 月 7 日 条約 6 号) .
- 13) 「核兵器の不拡散に関する条約 (NPT) TREATY ON THE NON-PROLIFERATION OF NUCLEAR WEAPONS」 (採択 (作成) 一九六八年七月一日 (ロンドン・モスクワ・ワシントン), 効力発生 一九七〇年三月五日, 日本国 一九七〇年二月三日署名、七六年五月二四日 国会承認、六月八日 批准書寄託、公布 (条約六号)、発効) .
- 14) “IAEA SAFEGUARDS GLOSSARY 2001 Edition, INTERNATIONAL NUCLEAR VERIFICATION SERIES No. 3,” IAEA, June, (2002).
- 15) 「原子力の平和的利用に関する協力のための日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定」 (昭和 63 年 7 月 2 日条約 5 号, 発効昭和 63 年 7 月 17 日 外務省告示 354 号) .
- 16) 「IAEA 放射性物質安全輸送規則 2009 年版の取り入れ等に伴う『核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則』等の一部改正について」, 文部科学省 科学技術・学術政策局 原子力安全課, 経済産業省 原子力安全・保安

院 核燃料管理規制課, 国土交通省 大臣官房 参事官 (運輸安全防災) (平成 22 年) .

- 17) 安積 聡, 森 正明 他, 「原子炉用燃料集合体」, 公開特許公報, 特開 2004 - 177241, 平成 14 年 11 月.
- 18) K. Yoshiok, S. Watanabe, et al., “A Minimal-Content Gadolinia in Above 5wt% Enrichment Fuel for Criticality Safety in Next-Generation LWR,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head, SC, USA, April, (2009).
- 19) N.Watanabe and H.Tamaki, ”Review and Compilation of Criticality Accidents in Nuclear Fuel Processing Facilities Outside of Japan,” JAERI-Review 2000-006, JAERI (2000).
- 20) USGS (米国地質調査所) の 2005 年版, 2012 年版年次報告,
(http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/).
- 21) “Global Rare Earth Oxide (REO) Production Trends,” , USGS,
(http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/).
- 22) “2006 Minerals Yearbook Rare Earths,” , USGS, (2006).
(http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/).

第3章 エルビア核特性データの取得

3.1 緒言

本章においては、エルビアクレジット燃料を実用化するための技術課題のうち、エルビアの核特性データ取得とその解析評価について述べる。

エルビアは海外の商業炉においては可燃性毒物として一般的に用いられている物質であり、原子炉内での核特性はこれまでに研究実績はある^{1,2,3)}。しかしながら、毒物クレジットとして「濃縮度 5wt%を超える燃料全てに薄く混入させ、その反応度を濃縮度 5wt%以下と等価もしくはそれ未満とする」というコンセプトは過去に実施例はなく、本研究の固有の視点である。表 3.1 にエルビアクレジット燃料と既存の毒物入り燃料との比較を示すが、表の通り、エルビアクレジット燃料の主な利用目的は臨界安全上の課題の解決である。この観点から原子炉外での加工施設や貯蔵施設などのスペクトル場に対する核特性データは必ずしも十分ではない。

また、濃縮度 5wt%超燃料については、1998 年に開催されたアメリカ原子力学会(ANS)の年次大会にて、原子力臨界安全部会(NCSD)主催の特別セッションが開かれている。このセッションは『濃縮度 5wt%の壁を越えて(原題: Braking the 5wt% Barrir)』と題され、濃縮度 5wt%超燃料を導入するために必要となるデータの状況、および解析ツールの信頼性評価の必要性について議論されている^{4,5)}。

この他にも表 3.1 に示す項目と併せて、エルビアクレジット燃料には下記のように既存の原子燃料にはない特徴がある。

- ・ ウラン濃縮度は 5～10wt%
- ・ エルビアが体系全体に薄く分布
- ・ エルビア濃度は 0.2～1wt%程度^a
- ・ 加工工程から原子炉までさまざまな中性子スペクトル場 ($H/^{235}U$ で約 60～260 程

^a エルビア濃度の下限は、現行の製造技術において毒物の濃度や均一性を実用規模で担保できる濃度の下限として設定した値である。また上限については、別途集合体核設計の結果より、エルビアによる反応度ペナルティにより大きく中性子経済を損なわない範囲で設定している。これらはいずれも実用的なエルビア濃度範囲として設定したものである。臨界安全上必要となる毒物濃度は第 4 章にて詳細に検討しているが、濃縮度 6wt%時に 0.3wt%のエルビア濃度が必要との結果となっており、これを概ね包絡するエルビア濃度の実験が求められる。

度^{b)} にさらされる

このため、エルビアクレジット燃料の実用化のためには、これらの仕様を系統的に模擬できる核特性データを取得することが要求される。

上記の要求を満たすにあたり、本研究では京都大学臨界集合体実験装置⁶⁾(以下 KUCA と略す)を使用し、一連の実験を実施することとした。KUCA の炉心概要を図 3.2 に示す。棒形状の燃料要素を用いる臨界実験装置では一般に、目的とする濃縮度毎に燃料棒を製作し、毒物の模擬については実際に毒物入りの燃料棒を製作する必要がある。また、減速材の割合を変化させる際は、燃料棒の径を変えたり燃料棒の間隔を変えたりする、あるいは水排除管や水排除棒を配置したりするなど、大がかりな装置の改造を伴う。このため、様々なパラメータを系統的に変更させながら実験を実施することは困難である。

これに対し KUCA は、板状形状の燃料要素を有しており、核燃料物質である 93%濃縮ウラン燃料板(ウラン-アルミニウム合金)と天然ウラン板、減速材物質であるポリエチレン板や黒鉛板などセル内の燃料板の組み合わせを変化させることで容易にセルの平均濃縮度や減速材割合を変化させることが可能である。加えて、当該実験のためにエルビア板を新規に追加することで、エルビア濃度も系統的に変化させることを可能とする。エルビアを用いた臨界実験は KUCA はもちろん、我が国国内でも過去に実施例が無く、本邦初の実験となる。また炉心全体にエルビアを装荷する実験は世界的にも報告例は無く、貴重なデータとなる。

また、本章では実験そのものの妥当性確認と断面積データの適用性確認とを目的として解析計算を実施する。計算コードとしては日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)にて開発され、我が国国内で標準コードとして広く使用されている 2 つのコードシステム、即ち確率論的手法である MVP コード⁷⁾と決定論的手法である SRAC コード⁸⁾を用いる。MVP は連続エネルギーモンテカルロコードであり、原理的には解析の近似による誤差は無く、核設計断面積そのものの精度検証が可能である。MVP コードでは非常に信頼性の高い予測計算が可能であるため、断面積の不確定性から推定される以上の差異が実験値と計算値との間で生じていないかを確認することで、実験そのものの妥当性を確認することが可能である。

本章ではまず、エルビア実験の成立性を確認するために本格実験に先立って実施した事前検討について述べる。事前検討として模擬エルビア板にて予備実験を実施し、そこで得られた知見を踏まえて、本格実験の炉心を設計・構築した。

続く本格実験では、エルビア非装荷の参照用炉心とエルビア装荷炉心を合わせて 5 炉心を構築し、ウラン濃縮度、エルビア濃度、中性子スペクトルなどを変化させた系統的

^{b)}減速材比 $H/^{235}\text{U}$ については、実機燃料集合体(濃縮度 5wt%)の常温時の $H/^{235}\text{U}$ は約 90、実機 PWR での運転条件の水密度は約 0.7g/cm^3 であることから $H/^{235}\text{U}$ は約 60 程度である。また、加工施設等の臨界安全管理で用いられる未臨界データは最適減速状態も含まれるが、単純形状に対する評価結果から、濃縮度 5~10wt%に対して最適な $H/^{235}\text{U}$ は約 120~260 となっている。このことから、今回の実験では $H/^{235}\text{U}$ は約 60~260 程度をカバーしていることが要求される。

な実験を実施した。それぞれの炉心に対して、臨界状態の測定、エルビア板の反応度価値測定を実施し、エルビアに関する核特性データを取得した。

さらに、実験そのものの妥当性確認と断面積データの適用性確認のため、得られた一連のエルビア入り燃料の臨界実験について、確率論的手法である MVP コードと決定論的手法である SRAC コードを用いて計算を実施した。計算結果をもとに、実験の妥当性や計算コードの適用性について評価した。

3.2 方法

3.2.1 予備実験

エルビアクレジットとは対象とするウラン燃料全体に、ウランの濃縮度に応じて均一に低濃度のエルビアを混入されるコンセプトである。このため、当該実験ではウラン濃縮度を変化させるとともにエルビア濃度も系統的に変化させる必要があるため、新規にエルビア板を導入する必要がある。しかしながら、国内でエルビアを用いた臨界実験の例はなく、KUCA においてもエルビア板を用いての実験は初めての試みとなる。そこで、予備実験によりエルビア実験の成立性を検討した。実施項目は

- ・ エルビア燃料板の仕様検討
- ・ エルビア反応度の測定可能性確認
- ・ 本格実験計画の策定

である。次節より詳細を示す。

1) 実験概要

予備実験は、KUCA の A 架台に高濃縮ウラン炉心を構築し、サンプルエルビア板を新たに製作し、上記高濃縮ウラン炉心に装荷して実施した。予備実験のために試作したエルビア板を図 3.3 に、炉心の構成（平面図）を図 3.4 にそれぞれ示す。

当該炉心は、高濃縮ウラン燃料板とポリエチレン減速材板からなる燃料体を、ポリエチレン反射体で取り囲んだ体系である。水素対ウラン 235 の原子数比($H/^{235}U$)が約 316 と、KUCA 固体減速炉心の中ではもっとも中性子スペクトルの柔らかい炉心である。

予備実験用のエルビア板は、50mm 四方・厚さ 5mm の黒鉛板上にエルビア(Er_2O_3)を厚さ 100 μm で溶射して製作した。エルビアの塗布量は一枚あたりおよそ 2.4g である。エルビアが体系に与える反応度効果を確認するため、エルビア板（エルビアを塗布した黒鉛版）と黒鉛板（エルビアを塗布していない黒鉛板）とを用意した。両者の差はエルビア有無だけであるので、これらを置換することによりエルビアによる核特性の変化を評価できる。

サンプル置換用セルを図 3.5 に、それぞれのサンプル置換用セルの燃料体への実装の様子を図 3.6 及び図 3.7 に、炉心への装荷の状況を図 3.8 にそれぞれ示す。今回の実験では、合計 21 体ある燃料体のうち、図 3.4 中の「そ-15」に位置する 1 体について、燃料体上部から 19 番目の単位セルを、図 3.5 に示すサンプル置換用セルに置き換えたサンプル用燃料体として用いた。

なお、エルビア板についてはエルビアコーティング面の保護と塗布したエルビアの剥離による KUCA の汚染防止のために、全体をアルミフویلでカバー^cした状態で燃料体を実装した。

2) 測定実験

臨界状態については、下記の手順にて測定を行った。

- ・ 制御棒位置の調整により体系を臨界とする
- ・ 臨界位置にある制御棒を体系から全引抜とする
- ・ 中性子検出器の時間応答より出力の倍加時間を求める
- ・ 倍加時間をペリオドに変換する
- ・ 逆時間方程式を解いて余剰反応度を求める

実験は、サンプル置換用セルを基準セルあるいはエルビアサンプルセルとした場合について行った。再現性の確認と実験データの統計誤差の低減のため、サンプル置換用セルの組み替えを複数回行ない、その都度余剰反応度を測定した。エルビアサンプルセルの余剰反応度と、その前後に測定した基準セルの余剰反応度の差として求めたエルビア置換反応度価値を表 3.1 に示す。

実験の結果、エルビア置換反応度価値は $1.376 \times 10^{-3} \Delta k/k$ 、相対誤差は約 2.5% となった。

3) 解析評価

上述したエルビア置換反応度価値実験について汎用公開コード SRAC を用いて解析を行った。SRAC コードは KUCA の実験解析に広く用いられているコードである。今回使用した断面積ライブラリは JENDL-3.3、エネルギー群数は 107 群である。得られた置換反応度の計算結果を表 3.2 に示す。

置換反応度の計算値と測定値の差 (C/E 値) は 1.06 となり、およそ 6% 程度で実験値が再現できた。これは過去の KUCA における SRAC 実験解析結果と比較して同程度の誤差であり、妥当な結果と言える。

^c アルミは中性子吸収効果が非常に小さく、核特性評価上は存在を無視できる。

4) 予備実験のまとめ

予備実験により、下記のことが確認された。

- ・ KUCA に装荷可能なエルビア燃料板が製造可能であること
- ・ KUCA において、エルビア板を用いた実験体系を構築することが可能であること
- ・ エルビアの反応度価値は測定可能であること
- ・ 既存の断面積コード、核設計コードはエルビアに適用可能であること

以上の予備実験をふまえ、KUCA における本格的なエルビア実験に向けた炉心を策定することとした。

3.2.2 本格実験の炉心策定

エルビアクレジット燃料は、濃縮度 5～6wt%UO₂ 燃料に対し、エルビア装荷割合として 0.2wt%以上を想定している。一方、予備実験で用いたサンプルエルビア板は、エルビアのコーティング厚が 100 μ m, エルビアの塗布量が一枚あたりおよそ 2.4g である。KUCA 燃料板に含まれるウランとの重量比を考慮すると、実機相当のエルビア装荷割合を模擬するためには、KUCA 高濃縮ウラン燃料板およそ 20 枚につきエルビア板 1 枚の割合で装荷する必要がある。これはかなりエルビアが偏在している状態であり、体系全体に薄く広くエルビアを装荷するという要求からは乖離がある。

そこで、このような体系内への局在化に起因する非均質性を極力避けるため、本格実験においてはエルビアのコーティング厚をできる限り減少させ、一枚あたりのエルビア装荷量を減少させたエルビア板を製作することとした。また、母材の黒鉛板についても、同様に厚みを薄くして、炉心の減速材比に与える影響を軽減することとした。

以上を鑑み、エルビア板の仕様として

- ・ 黒鉛母材厚 3.2mm (1/8")
- ・ エルビアコーティング厚 10 μ m
- ・ エルビアの装荷割合は濃縮ウラン燃料板 2 枚あたりエルビア板 1 枚

と仮定して臨界炉心の成立可能性と、それに必要な燃料板およびエルビア板の枚数のサーベイ計算を行った。

計算には、連続エネルギーモンテカルロコード MVP を用い、全炉心を詳細にモデル化し、燃料体内の各種物質板とエルビア板との配列を様々に変化させた炉心を模擬した。計算対象として、平均ウラン濃縮度 9.6wt%および 5.4wt%の燃料について、それぞれ H/²³⁵U 比を 300 程度と 150 程度としたもの、合計 4 種類の炉心を設定した。

その結果、ウランの平均濃縮度が 5.4wt%の炉心については全ウラン量に対してエルビアの重量割合は 0.24wt%となり、実機での設計値とほぼ同等の炉心が成立する見込み

が得られた。同様に、平均ウラン濃縮度 9.6wt%の炉心についても、 ^{235}U 対エルビウム重量比が実機での設計値とほぼ同等の炉心が成立する見込みが得られた。

解析の結果を表 3.3 に、各炉心の燃料単位セル構成図および臨界炉心配置図を図 3.9 に示す。実際に構築可能な炉心の範囲はエルビウム板の総数に依存するが、今回想定した臨界炉心が物理的に実現可能であることがわかった。

3.2.3 エルビウム模擬板の製作

前節までに示した予備実験およびその実験解析を通じ、実験に用いるエルビウム模擬板について、下記の知見が得られた。

- ・ 黒鉛基板にエルビウムを塗布した模擬板は KUCA での実験に問題なく使用可能であること
- ・ 炉心内での均一性を実現するために、黒鉛基板およびエルビウム塗布厚さは可能な限り薄いことが望ましいこと
- ・ エルビウムの剥離による炉内の汚染を避けるため、剥離を防止する方策が必要であること

これらの知見と、KUCA 本格実験の実験計画策定のために実施した予備計算結果に基づき、本格実験で用いるエルビウム模擬板として、図 3.10 示すように、50.2mm 四方・厚さ 1.5mm の黒鉛板の中央部に凹みを設け、その底部に 0.3g のエルビウム(Er_2O_3)を焼き付けたものを 1000 枚程度製作した。この模擬板は、予備実験で用いたものに比べると全体厚さでおよそ 1/3、エルビウム塗布量でおよそ 1/10 であり、より非均一性の少ない実験が可能となっている。

3.2.4 炉心の構築

KUCA 本格実験は、KUCA の固体減速架台の一つである B 架台を用いて行った。以下に実験の詳細について述べる。

1) 燃料要素

今回の一連の実験に使用した全ての燃料要素の諸元を表 3.4 に示す。

燃料板としては、厚さ 1/16 inch (1.6 mm)、高濃縮度ウラン-アルミ合金と、厚さ 1mm、天然ウラン金属の 2 種類を使用した。減速材としては、厚さ 1/8 inch (3.2 mm) と 1/16 inch (1.6 mm) のポリエチレン板を使用した。いずれも 2 inch (50.8 mm) 四方の大きさであり、これらの板の組み合わせにより、様々な濃縮度と減速材割合の模擬が可能となっている。図 3.2 に示すように、上下部の反射体もポリエチレン製である。

これらの燃料要素をアルミ製のさや管に挿入し、燃料体を構成する。アルミさや管と制御棒の寸法諸元を図 3.11 に示す。測定中は全ての制御棒は全引き抜き状態となる。

さらに、エルビアを炉心全体に薄く装荷する体系を模擬するため、3.2.3 節に示したエルビア板を 1000 枚程度新たに製作した。エルビア板は 2 inch (50.8 mm) 四方で厚さ 1.5 mm のグラファイト板に深さ 0.2 mm のくぼみを作り、そこに厚さ 30 μm でエルビアを蒸着塗布したものである。1 枚当たりのエルビアの重量は約 0.3 g である。

2) 炉心構成

3.2.2 節で設計した 4 つのエルビア装荷炉心を構築し、それぞれ Core-1 から Core-4 と命名した。それぞれの炉心の諸元を表 3.5 に示す。ここで、平均濃縮度や平均エルビア濃度などの各諸元はドライバー領域を除外したテスト領域のみで算出している。表 3.5 には参照炉心として、エルビアを全く装荷していない炉心も Core-0 として併せて示している。

また、各炉心の燃料体構成と炉心構成をそれぞれ図 3.12 と図 3.13 にそれぞれ示す。Core-2, 3, 4 は炉心の反応度を満たすために周囲にドライバー領域を設けているが、平均ウラン濃縮度やエルビア濃度は、これらドライバー領域を除外して算出している。炉心の臨界性を調整するために、ドライバー燃料のうち一体について、一部燃料板の数を減少させている。

Core-1 で用いた燃料体は、濃縮ウラン燃料板 1 枚と天然ウラン板 1 枚とをポリエチレン減速材板と組み合わせ、平均濃縮度 5.4wt%，水素対ウラン 235 比($\text{H}/^{235}\text{U}$)約 280 の燃料セルを構築し、濃縮ウラン燃料板 2 枚に対してエルビア模擬板 1 枚を燃料体全数に混載して、エルビア濃度約 0.3wt%としたものである。この燃料体をポリエチレン反射体で取り囲んでいる。

Core-2 は、平均ウラン濃縮度 5.4wt%，エルビア濃度 0.3wt%， $\text{H}/^{235}\text{U}$ 比約 91 のエルビア装荷燃料テスト領域（燃料体 25 体）をウラン濃縮度 93wt%， $\text{H}/^{235}\text{U}$ 比約 103 の高濃縮ウラン燃料ドライバー領域炉心で取り囲んだゾーン型炉心である。

エルビア装荷燃料テスト領域は、濃縮ウラン板 2 枚、天然ウラン板 2 枚、1/8"厚ポリエチレン板 2 枚とエルビア模擬板 1 枚を組み合わせたものである。また、体系の臨界性を確保するために設けられたドライバー領域は濃縮ウラン板 2 枚と 1/8"厚ポリエチレン板 2 枚を組み合わせたものであり、エルビア装荷燃料テスト領域とほぼ同じ中性子スペクトルを有する。これらの単位セルを、テスト領域燃料では 28 回、ドライバー領域燃料体では 38 回それぞれ繰り返し、上下反射体領域と組み合わせることでそれぞれの燃料体を構成している。

Core-3 は、よりハードな中性子スペクトル下における核特性の取得を目的として構築されたもので、平均ウラン濃縮度 9.6wt%，エルビア濃度 0.6wt%， $\text{H}/^{235}\text{U}$ 比約 48 のエルビア装荷燃料テスト領域（燃料体 21 体）を、Core-2 と同じ高濃縮ウラン燃料ドライバー領域で取り囲んだゾーン型炉心である。テスト領域燃料単位セルは濃縮ウラン板 2 枚、天然ウラン板 1 枚、1/8"厚ポリエチレン板 1 枚とエルビア模擬板 1 枚を組み合わせ

たものである。この単位セルを 40 回繰り返す、上下反射体領域と組み合わせることでテスト領域燃料体を構成している。

Core-4 は、より高いエルビア濃度における核特性の取得を目的として構築されたもので、平均ウラン濃縮度 9.6wt%、エルビア濃度 1.12wt%、 $H/^{235}U$ 比約 148 のエルビア装荷燃料テスト領域（燃料体 21 体）を、Core-2,3 よりさらに減速材割合を増やした高濃縮ウラン燃料ドライバ領域で取り囲んだゾーン型炉心である。ドライバ領域は濃縮ウラン板 2 枚と 1/8"厚、1/4"厚ポリエチレン板各 1 枚と天然ウラン板 1 枚とを組み合わせたものである。テスト領域燃料単位セルは濃縮ウラン板 2 枚、天然ウラン板 1 枚、1/8"厚、1/4"厚ポリエチレン板各 1 枚とエルビア模擬板 2 枚を組み合わせたものである。この単位セルを 23 回繰り返す、上下反射体領域と組み合わせることでテスト領域燃料体を構成している。

3) 炉心特徴のまとめ

表 3.4 から、下記に示すように今回の一連の実験は 3.2.1 節で示したエルビアクレジット燃料の仕様を適切にカバーしていることがわかる。

- ・ 濃縮度は 5wt%を超え、5–10 wt%の範囲である
- ・ エルビアは均一に薄く体系全体に分布しており、平均濃度は 0.3–1.12 wt%の範囲である
- ・ 減速材比 $H/^{235}U$ は 48 から 274 である

さらに、各炉心の燃料体について、格子計算コード SRAC によるスペクトル計算の結果を図 3.14 に示す。図 3.14 から、今回構築した一連の炉心が幅広い中性子スペクトルを模擬していることがわかる。

これらの炉心の比較により、下記のような検討が可能である。

- ・ Core-0 と Core-1 はエルビアの有無以外は全く同一の炉心である。このため、Core-0 と Core-1 の比較からエルビアが存在することによる臨界性への影響を直接評価することが可能である。
- ・ Core-1 と Core-2 はウラン濃縮度もエルビア濃度も共に同一であり、それぞれ 5.4 wt%と 0.3 wt%である。両炉心の違いは減速材比 $H/^{235}U$ であり、スペクトルの影響の比較が可能である。
- ・ Core-3 と Core-4 はともにウラン濃縮度 9.6wt%であるが、エルビア濃度はそれぞれ 0.6wt%と 1.12wt%となっている。また、減速材比 $H/^{235}U$ もそれぞれ 48 と 148 となっており、高濃縮度におけるエルビア濃度およびスペクトルの違いを比較できる。

3.3 結果

3.3.1 臨界近接

2006 年から 2008 年にわたり、Core-1 から 4 を順次構築し、実験を行った。本邦初となる全炉心エルビア装荷炉心である Core-1 は 2006 年 12 月に初めて臨界に達した。続いて、Core-2, 3, 4 は 2007 年 12 月から 2008 年 12 月の間にそれぞれ臨界に達した。

各炉心において、臨界近接は逆増倍計数法を用いて行われた。逆増倍計数と燃料体の装荷数の相関は、実験に先立って予め連続エネルギー群モンテカルロコード MVP を用いて算出した。詳細な臨界調整は出力微調整用の制御棒によって実施した。Core-2, 3, 4 は炉心を臨界に達成させるためドライバー領域を含んでいるが、炉心の停止余裕を満足し、余剰反応度を適切なレベルにするため、一部のドライバー燃料において軸方向の燃料板数を増減させている。

炉心が臨界に到達した後は、微調整用制御棒を全引き抜きとして余剰反応度をペリオド法にて測定した。ペリオド法においては、炉心出力の倍加時間を測定し、実効遅発中性子割合や即発中性子寿命などのパラメータは決定論的手法コード SRAC によって算出し、これらを用いて反応度へ換算した。

再現性を確認するために、臨界性は同じ体系で数回測定した。複数回の測定により、臨界性に関する測定不確定性は 3 % ($=1\sigma$) と決定した。この値は、過去の KUCA 実験と同程度であり、妥当なものである。

3.3.2 エルビア板置換反応度

エルビア板置換反応度はエルビア板（エルビアを塗布したグラファイト板）とグラファイト板（エルビア板と同じ幾何形状でエルビアを塗布していないグラファイト板）とを置換することで得られる添加反応度として定義する。

系統的なエルビア核特性データの取得のため、それぞれの体系においてエルビア板置換反応度を測定した。

エルビア板置換反応度の測定は、炉心中央位置の燃料体について実施した。最初の置換エルビア板は炉心中央の当該燃料体の軸方向中心位置の一枚とし、順次上下対称に一枚ずつエルビア板を置換し、その都度、ペリオド法にて添加反応度を測定していった。測定は、軸方向全てのエルビア板が置換されるまで行っていたが、置換による添加反応度が KUCA の安全制限値を逸脱する際はそこで終了とした。

測定は同一条件にて複数回実施し、再現性から不確定性を評価した。その結果、各エルビア板置換反応度の不確定性は 1σ で概ね 3 % 以下となった。

また Core-2, 3 においては、サンプル置換反応度測定データの分析のための補助デー

タとして、テスト領域における中性子束分布形状およびスペクトル情報を取得するために、金線・金箔を用いた反応率分布測定を実施した。金線反応率分布の測定結果を図 3.15 および 3.16 にそれぞれ示す。

3.3.3 臨界性の解析

KUCA 実験の目的は、エルビアクレジットを用いた臨界安全性評価に使用する計算コードの妥当性を確認することである。一方当節では、実験そのものの妥当性確認と核データコードの適用性確認の観点から、日本で参照用コードとして幅広く使用されている連続エネルギーモンテカルロコード MVP と決定論的手法コード SRAC を用いて実験解析を実施した。

1) 確率論的手法による解析

KUCA の固体減速架台の構造（幾何形状と物質組成）は可能な限り厳密に模擬し、連続エネルギーモンテカルロ法コード MVP を用いて解析を行った。解析には、5 種類の核データライブラリ (JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.0, JEFF-3.0, JEFF-3.1) を用い、5000 万ヒストリ (1 バッチあたり 5 万ヒストリ×1050 バッチ, 捨てバッチ 50) にて計算した。この計算条件において、炉心実効増倍率の統計誤差は 0.01% 以下である。

図 3.17 は上記 5 種の断面積ライブラリを用いてそれぞれの炉心について中性子実効増倍率 k_{eff} の計算値と測定値の比較を C/E (calculation / experiment) で表したものである。図 3.17 において、誤差バーはモンテカルロ計算における 3 シグマの統計誤差幅を示している。すべてのケースにおいて、C/E 値は 0.998-1.004 の範囲内で予測できている。ライブラリ間の最大差は 0.003 程度である。

3.3.4 エルビア板置換反応度の解析

1) 確率論的手法による解析

エルビアを塗布した黒鉛板を、エルビアを塗布していない黒鉛板に順次置換することで測定されたエルビア板置換反応度効果については、まず確率論的手法を用いた MVP コードにより解析を行った。Core-1 を対象として計算値と測定値の比較結果を図 3.18 に示す。

図 3.18 より、MVP コードの解析結果は測定誤差の範囲内で一致しており、妥当な結果であると言える。しかしながら本反応度効果については、確率論的計算に伴う統計誤差が、評価対象である炉心反応度の差異に比べて大きい。このため、ライブラリ間の傾向を評価するなどの有意な検討を行うことが困難である。

もちろん、計算ヒストリ数を増大させれば統計誤差は減少するが、定性的に、統計誤差を 1/2 にするためには計算ヒストリ数を 4 倍以上にする必要があり、一枚ごとにエルビア板を逐次置換していく当該解析においては現実的ではない。このため当該エルビア板置換反応度の解析には、確率論的手法ではなく次節に示す決定論的手法を用いること

とした。

2) 決定論的手法による解析

エルビア板置換反応度効果について、決定論的手法を用いた SRAC コードにより解析を行った。反応度効果については、評価する炉心反応度の差異が微少であることから、計算結果に統計誤差が伴うモンテカルロ法では解析が困難であるが、決定論的手法は統計誤差を伴わないのでこのような微小な反応度変化の評価も可能である。

エルビア板置換反応度は 3 次元(XYZ 体系)拡散計算における摂動計算にて評価した。断面積は 107 群核データライブラリを用い、衝突確率法によるセル計算を行ない、得られた 107 群セル平均断面積を 30 群に縮約した。ライブラリとしては JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.0, JEFF-3.0, JEFF-3.1 の 5 種類を使用し、比較した。結果を図 3.19 に示す。

3.4 考 察

3.4.1 臨界性解析

図 3.17 より、ライブラリ間の幾つかの顕著な傾向が見て取れる。第一に、JEFF-3.1 と ENDF/B-VII.0 は実効増倍率を過大評価する傾向があるのに対し、ENDF/B-VI.8 は他のライブラリに比較して過小評価する傾向がある。これらの傾向は実験体系に依らず一様に見られるので、これらの傾向は各ライブラリが持っている固有の傾向と考えられる。

Core-0 と Core-1 は全炉心にエルビアの有無以外は ^{235}U 濃縮度および燃料対減速材体積比が同一の炉心である。得られた結果を表 4.2.3 に示すが、これら 2 つの炉心における C/E 値に有意な差異は無く、エルビア板の装荷の有無によって炉心実効増倍率の C/E 値は変動しないことを確認した。この結果から、エルビアの有無によって実効増倍率の計算精度はほとんど変化せず、エルビアの反応度効果は精度良く予測可能であることが確認された。

核データライブラリ間での炉心の実効増倍率の差の原因をより詳細に調べるために、それぞれのライブラリにおいて、 ^{235}U の断面積のみ変更した場合、 ^{238}U の断面積のみ変更した場合、H の断面積のみ変更した場合、エルビアの断面積のみ変更した場合、のそれぞれについて解析を行った。その結果、 ^{235}U 、H、エルビアの断面積を変更した場合は、統計誤差以上の差異が生じることはなかったが、 ^{238}U の断面積のみ変更した場合は図 3.17 に見られるような差異が表れることがわかった。このことから、核データライブラリ間の実効増倍率の系統的な差は、エルビアの断面積の違いによるものではなく、 ^{238}U 断面積が原因の 1 つであると考えられる。

次に、主な炉心パラメータと評価された C/E 値の相関を図 3.20 (a)~(c)に示す。比較したパラメータは、平均ウラン濃縮度、平均エルビア濃度、減速材割合である。図 3.20

より、これらのパラメータと各ライブラリの C/E 値との明確な相関は見られない。特に、エルビア濃度に関してもエルビア濃度の増加に伴って C/E 値が増加あるいは減少する傾向は見られない。同様に、炉心の ^{235}U 濃縮度および燃料対減速材体積比が変化しても実効増倍率の C/E 値には大きな変化が見られない。このことは、幅広い中性子スペクトル場に対してエルビアの吸収効果を精度良く予測可能であることを示している。

一方、Core-2 に対していずれのライブラリも C/E 値を過小評価する傾向も見てとれる。この理由は現時点で明確にはなっていないが、Core-2 はエルビア濃度や減速材比の観点から特異な点は無く、過小評価の理由はエルビアの存在に起因するものではないと推定できる。

本研究においては、濃縮度 5wt% を超える燃料に対してエルビアによって濃縮度 5wt% 以下のエルビアを含まない燃料と反応度的に等価であることを評価することが重要である。この観点から、評価ツールに求められるのはエルビアの有無や濃縮度の高低によって設計精度が変化しないことである。例えば測定値と設計値の差に一定のバイアスが存在しているとしても、差にエルビア濃度依存性やウラン濃縮度依存性が無く、各体系間の相対的な反応度差を適切に評価できれば本研究における臨界安全性評価には十分である。

3.4.2 エルビア置換反応度解析

図 3.20 より明らかなように、エルビア板置換反応度の計算値と測定値の差異 (C/E 値) はエルビア板置換枚数が増加するにつれて過小評価する右肩下がりの傾向が見て取れる。これは、Core-1 から Core-4 までの全ての体系で共通であり、かつ、5 種類いずれの断面積ライブラリでも共通にみられる傾向である。

一方、図 3.18 に示したように、モンテカルロ計算コード MVP の結果では、統計誤差が比較的大きいとは言え、SRAC で見られるような右肩下がりの傾向は見えない。MVP は、体系の近似、エネルギー分解能、中性子輸送模擬の観点から、最も詳細かつ正確な計算モデルを使用している反面、SRAC コードでは体系の非均質効果、中性子輸送効果などは考慮できない。このことから、SRAC で見られる右肩下がりの傾向は必ずしもエルビアの断面積によるものではなく、非均質効果や中性子輸送効果を模擬できていないが故の誤差であると推察される。

そこでさらに、決定論的輸送コードによる摂動計算を実施し、中性子輸送効果の影響について検証した。まず JENDL-3.3 に基づいた 107 群の核データライブラリを用いて衝突確率法によるセル計算を行ない、得られた 107 群セル平均断面積を 78 群に縮約し、SN 法を用いた輸送計算コード TWOTRAN⁷⁾による計算を行った。

輸送理論による計算は拡散理論による計算よりも近似が少なく、より正確な評価が可能であると考えられるが、TWOTRAN は二次元輸送計算コードであるため、炉心を RZ 体系に近似する必要がある。実際の炉心は XYZ 体系であるので、XYZ 体系を RZ 体系

で近似することの妥当性については、RZ 体系および XYZ 体系の両方を取り扱える拡散計算コード CITATION により確認している。(図 3.21 参照)

TWOTRAN の RZ 体系によるエルビア板置換反応度効果の解析結果を図 3.22 に示す。図 3.22 と比較すると、C/E 値の誤差が減少し、かつ、右肩下がりの傾向も無くなっていることが分かる。このことから、SRAC の拡散計算によって見られた右肩下がりの傾向は輸送計算では解消されることがわかり、エルビア板の置換反応度効果は決定論的手法によって概ね数%程度の誤差で精度良く予測可能であることが明らかになった。

以上より、今回得られたエルビア反応度に関する一連の測定値および計算値は全般に妥当な傾向を示しており、一致は良好であると言える。エルビア板置換反応度に対する誤差は約 3%程度であり、測定の不確定性の 2~3 倍程度である。これにより、今回得られた測定値はエルビア反応度に関する計算コードの適応性検証に活用可能であることが確認できた。

3.4.3 臨界安全性評価ツールの確認

前節までの解析においては、主に断面積データの適用性確認と実験そのものの妥当性確認の観点から、旧日本原子力研究所（現 JAEA）で開発され参照用として広く使用されている MVP コードを用いて解析を実施した。一方、次章（第 4 章）では実際の加工施設を想定した臨界安全性評価に焦点を当てる観点から、燃料加工施設や輸送容器の臨界安全性解析に広く一般的に使用されている KENO コードを用いることとする⁶⁾。KENO コードは SCALE システムの一部として公開されており、臨界安全解析用のツールとして国内外で多くの使用実績のあるコードである。KENO コードにて各炉心の体系を模擬し、炉心臨界性の解析を行った。KENO コードによる実効増倍率の計算値と測定値の比較結果を図 3.23 に示す。図 3.23 は計算値と測定値の比 (C/E) を示したものである。KENO コードの計算においては、ヒストリ数 10000、バッチ数 10100、捨てバッチ 100 で計算し、実効増倍率に対する統計誤差は 1σ で $0.01\% \Delta k$ である。図 3.23 には、比較のため、前節で示した連続エネルギーモンテカルロコード MVP⁷⁾の解析結果のうち、JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.0 の 3 つのライブラリの計算結果も併せて示している。図中で示した誤差バーはいずれも 3σ の値である。

図 3.23 より、実効増倍率の C/E はいずれのケースにおいても 0.997~1.003 の範囲内で一致している。エルビアを含む KUCA 実験における KENO コードの C/E は MVP コードの結果と同等であり、妥当であると言える。KENO においては、Core-0 から Core-4 へとエルビア濃度が増加するにつれて若干計算値が測定値よりも高くなる傾向もみえる。Core-0 から 4 となるにつれエルビア濃度も増加しているため、エルビア濃度依存の誤差がある可能性があるが、エルビア濃度以外の条件も炉心毎に変化しており、元々非常に軽微な差異であるため特にエルビアに起因するとは特定できない。

また、仮にこのようなエルビア濃度依存性の誤差傾向があった場合、これは計算値が

エルビアの反応度を過小評価している傾向であり、必要十分な最小のエルビア濃度を算出するにあたってはエルビア濃度を高く評価する、即ち安全側の評価となる。前節でも述べたとおり、本研究においては、濃縮度 5wt%を超える燃料に対してエルビアによって濃縮度 5wt%以下のエルビアを含まない燃料と反応度的に等価であることを評価することが重要である。例え測定値と設計値の差に一定のバイアスが存在しているとしても、各体系間の相対的な反応度差を適切に安全側に評価できれば本研究における臨界安全性評価には十分である。

以上の考察により、臨界安全性評価に KENO コードを使用するのは妥当であると判断し、以降は KENO コードを用いて実施することとする。

3.5 まとめ

エルビアクレジット燃料の実用化に資する核特性データ取得のため、京都大学臨界集合体 KUCA を使用してエルビア燃料の臨界実験を実施した。既存の原子炉燃料には無いエルビアクレジット燃料の特徴を模擬するため、KUCA において下記の要求を満たす 4 つの炉心を構築した。

- ・ 体系平均のウラン濃縮度は 5～10wt%であること
- ・ エルビアが体系全体に薄く分布していること
- ・ エルビア濃度は 0.2～1wt%程度であること
- ・ 中性子スペクトルは軽水炉程度の軟スペクトルからできるだけ硬スペクトルまで ($H/^{235}U$ で約 60～260 程度) を包絡すること
- ・ これらの仕様を系統的に包絡できること

これらの炉心に対して逆増倍計数法により臨界近接を行い、臨界量を測定した。さらに、エルビアの核特性データの拡充のため、エルビア板の置換反応度を測定した。

本邦初となるこれら一連の実験の成功により、これまで得られていなかった幅広い中性子スペクトル条件下におけるエルビアの反応度効果に関する系統的な実験データが取得できた。このような実験データは世界的にも他に類を見ないものであり、エルビア含有燃料の核特性評価精度の検証に資することができる。

次に、KUCA において行った一連のエルビア入り燃料の模擬実験について 2 つの汎用コード、即ち確率論的手法である MVP コードと決定論的手法である SRAC コードを用いて解析を行なった。その結果、MVP コードでは、何れの炉心においても実効増倍率の測定値と計算値の相対差は 0.4%以下で一致することがわかった。また、エルビア装荷と未装荷の炉心において実効増倍率の C/E 値に有意な差はなく、エルビアを装荷した場合でも未装荷の場合と同程度の計算精度で実効増倍率を評価可能であることがわか

った。また、決定論的手法である SRAC コードを用いたエルビア板置換反応度効果の測定と計算の差は概ね数%程度であることがわかった。

これにより、実効増倍率 k_{eff} に関する計算値と測定値の一致は良好であり、今回実施した一連の実験は妥当であると考えられる。また、エルビア反応度に関する一連の測定値および計算値も全般に妥当な傾向を示しており、一致は良好であると言える。これにより、今回得られた測定値はエルビア反応度に関する計算コードの適応性検証に活用可能であることが確認できた。現在の核特性解析手法は、エルビアの吸収効果を幅広い濃縮度および中性子スペクトル場に対して精度良く予測することが可能であると言え、 ^{235}U 濃縮度や中性子スペクトルの変化によらずエルビアの吸収効果を解析により評価することが妥当であることを示している。

さらに、本研究で得られた測定データを用い、加工施設の臨界安全性評価コードとして広く用いられている KENO コードについても測定値との比較を行った。その結果、実効増倍率 k_{eff} の C/E はいずれのケースにおいても 0.997~1.003 の範囲内で一致し、参照コード MVP の結果と同等であり、KENO コードの信頼性を確認した。これにより、KENO コードを用いて臨界安全性評価を実施することは妥当であると判断する。

表 3.1 予備実験におけるエルビア置換反応度価値測定結果

測定回	エルビア置換反応度価値 ($\Delta k/k$)
1	1.401×10^{-3}
2	1.389×10^{-3}
3	1.336×10^{-3}
平均	$1.376 \times 10^{-3} (+/- 3.44 \times 10^{-5})$

表 3.2 予備実験におけるエルビア置換反応度値計算結果

炉心	計算値 (C, $\Delta k/k$)	実験値 (E, $\Delta k/k$)	C/E
A3/8” P36EU	1.461×10^{-3}	$1.376 \times 10^{-3} (+/- 3.44 \times 10^{-5})$	1.06

表 3.3 本格実験の事前設計例（臨界炉心諸元）

炉心名称	詳細名称*1	平均濃縮度	H/ ²³⁵ U	燃料板総数	エルビア板総数
9.6-A	B6/8"P17EU-NU-EU-Er(3)	9.6%	293	1054	527
9.6-B	B3/8"P24EU-NU-EU-Er(3)	9.6%	145	1776	888
5.4-A	B6/8"P17EU-NU-EU-NU-Er(3)	5.4%	274	1360	680
5.4-B	B3/8"P24EU-NU-EU-NU-Er(3)	5.4%	136	2856	1428

*1) 単位セル内の物質板構成に基づく名称で，KUCA 運転管理・実験管理上用いられるもの

表 3.4 燃料要素の材料特性一覧

Material	Description	Density (g/cm ³)
High-enriched U-Al alloy	Uranium enrichment is 93.2 wt%	3.12
	Uranium fraction is 20.2 wt%	
Natural uranium metal	Uranium enrichment is 0.71 wt%	17.86
Polyethylene	Polymer of CH ₂	0.94
Aluminum	Fuel element sheath /	2.69
	Control rod thimble tube	
Erbia coating	Erbia quantity per plate is 0.3 ^{*1} g	8.64
Graphite	Base of erbia coated plate	1.71

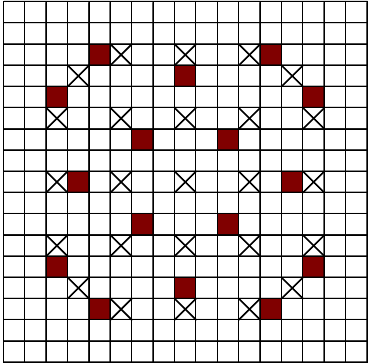
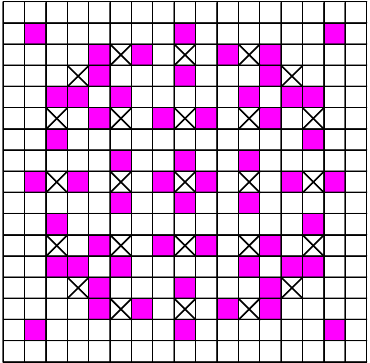
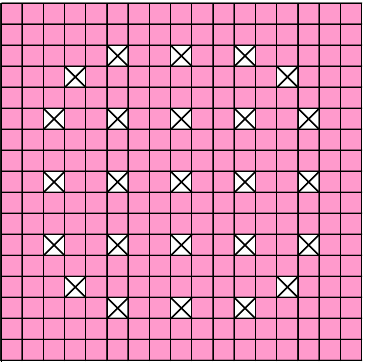
*1) Specification value. Not as-built value.

表 3.5 KUCA エルビア燃料装荷炉模擬炉心一覧

Core	Average enrichment	Average Er content ^{*1}	H/ ²³⁵ U	Remarks
core-0	5.4 wt%	---	274	Reference No erbia core
core-1	5.4 wt%	0.3 wt%	274	Entirely Er loaded core Very soft spectrum
core-2	5.4 wt%	0.3 wt%	91	Zone type core with driver Simulate PWR spectrum
core-3	9.6 wt%	0.6 wt%	48	Zone type core with driver Harder spectrum
core-4	9.6 wt%	1.12 wt%	148	Zone type core with driver Higher Er content

*1) Erbia / U-total

図 3.1 エルビアクレジット燃料と既存燃料の比較

	既存ガドリニア燃料 (国内外多くの軽水炉)	既存エルビア燃料 (米 CE 炉, 露 RBMK 炉)	エルビアクレジット燃料
ウラン濃縮度	5wt%以下	5wt%以下	5wt%超
添加量	4～10wt%	2～3wt%	0.2～1wt%
使い方	集合体内の特定の燃料棒 にのみ混入	集合体内の特定の燃料棒 にのみ混入	集合体内の全燃料棒（体系全体） に混入
集合体内 燃料棒配置例	 <div> □: UO₂棒 ⊗: 制御棒 ■: Gd入り </div>	 <div> □: UO₂棒 ⊗: 制御棒 ■: Er入り </div>	 <div> ■: Er入り ⊗: 制御棒 </div>

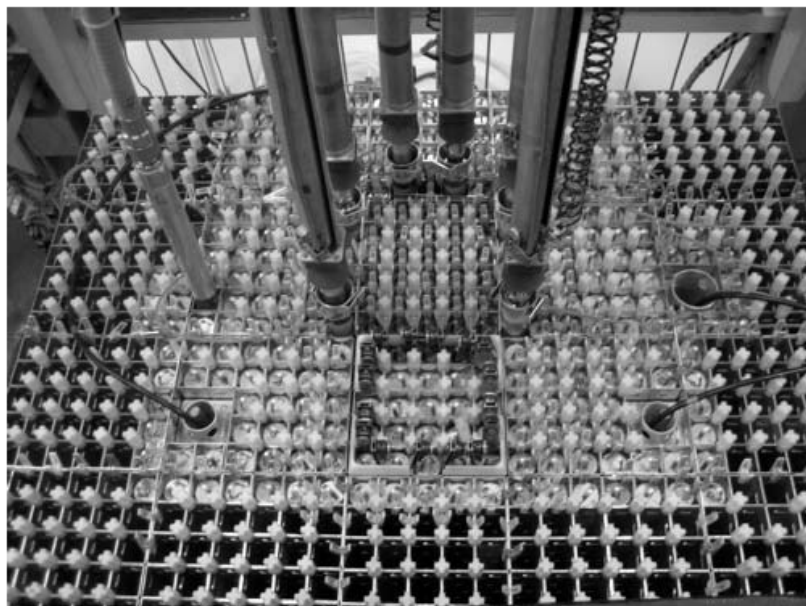
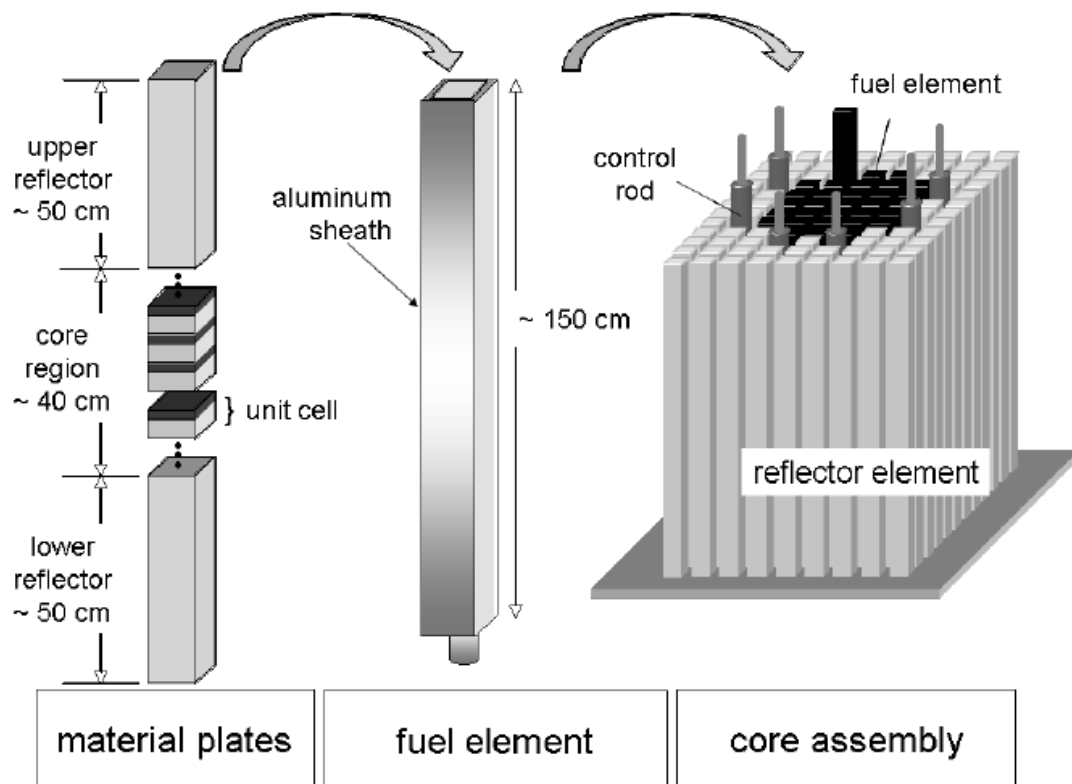


図 3.2 KUCA の炉心概要

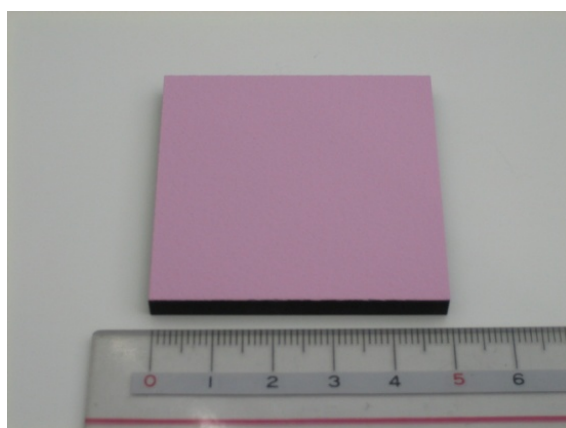


図 3.3 サンプルエルビア板（予備実験用試作品）

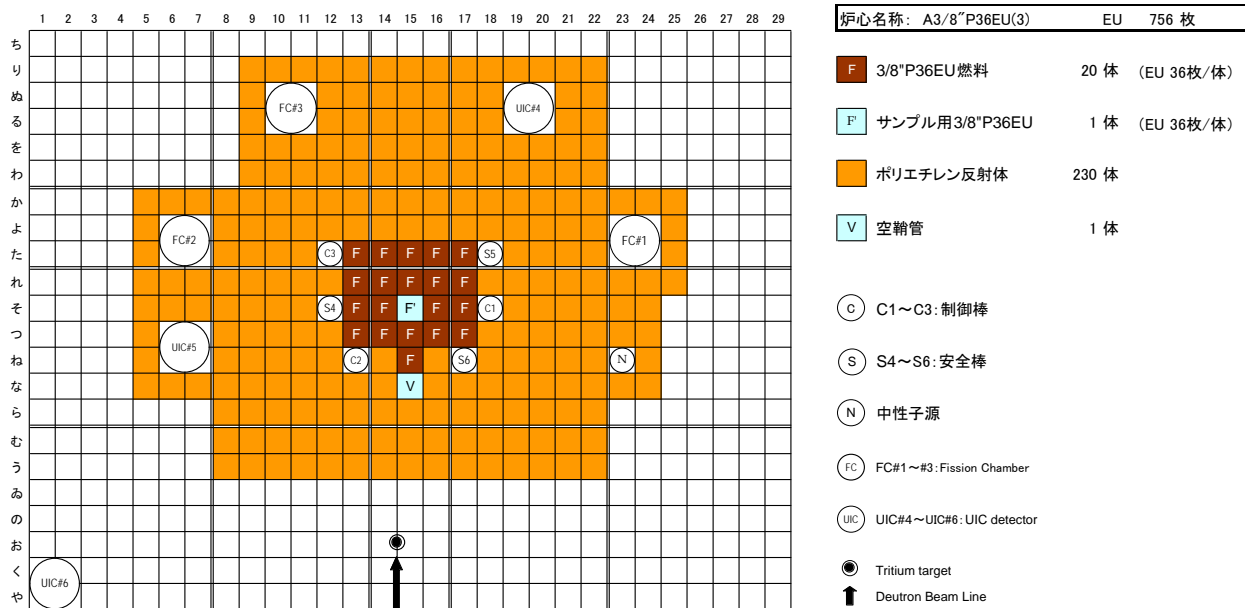


図 3.4 予備実験炉心構成図 (A3/8" P36EU(3))

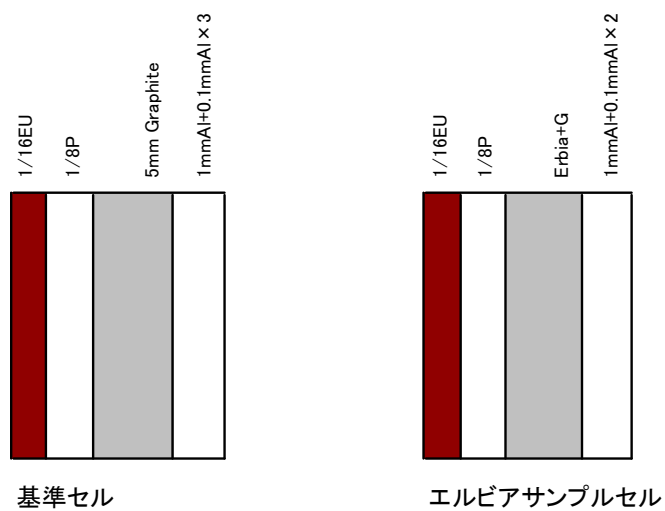


図 3.5 予備実験におけるサンプル置換用セル (A3/8” P36EU(3))



図 3.6 基準セルの燃料体への実装



図 3.7 エルビアサンプルセルの燃料体への実装

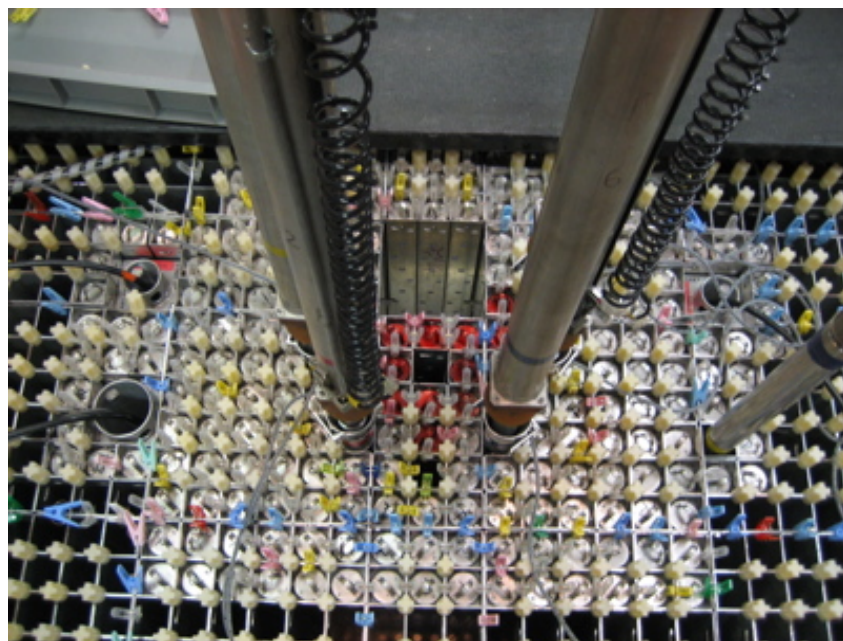
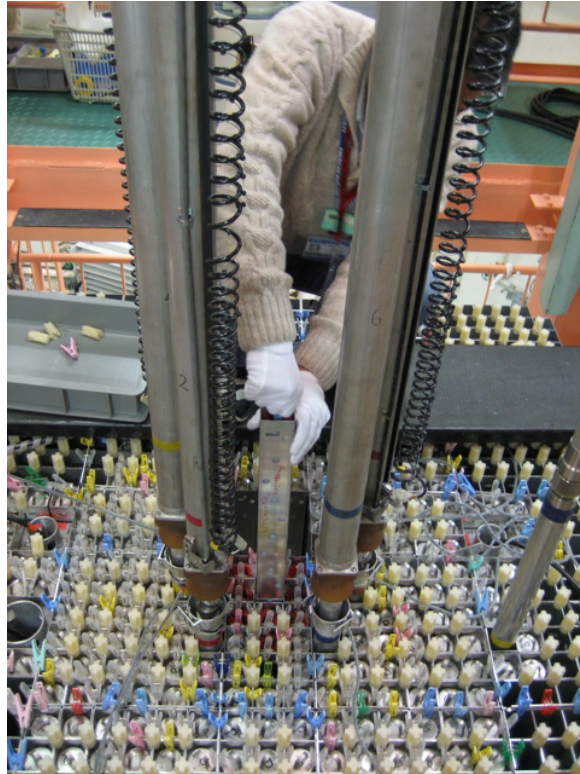
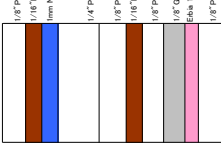
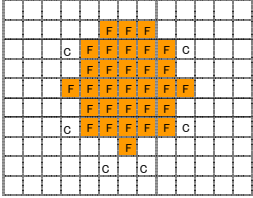
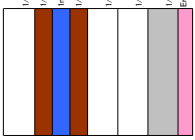
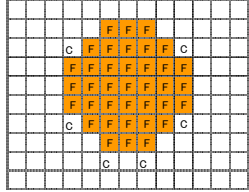
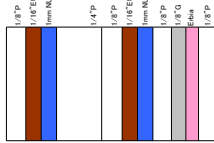
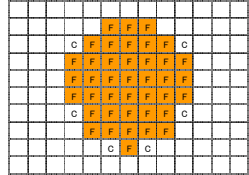
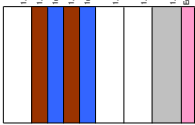
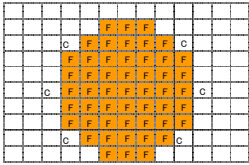


図 3.8 サンプル燃料体及び炉心への装荷

(左上：サンプル燃料体，右上：サンプル燃料体の装荷，
下：サンプル燃料体が引き抜かれた状態の炉心)

平均濃縮度	炉心名称	燃料単位セル構成図*1	臨界炉心配置図*2
9.6%	9.6-A		
	9.6-B		
5.4%	5.4-A		
	5.4-B		

*1 1/16"EU: 高濃縮ウラン燃料板, 1mm NU: 天然ウラン燃料板, 1/4"P: 1/4"厚ポリエチレン板, 1/8"P: 1/8"厚ポリエチレン板, 1/8"G: 1/8"厚黒鉛板 (ベースプレート), Erbia: 10µm 厚エルビア

*2 F: 燃料体, C: 制御棒位置 (引き抜き状態), 記号無し: ポリエチレン反射体。炉心燃料部および周辺のポリエチレン反射体のみを図示しており, 外周部のポリエチレン反射体, 中性子検出器位置等の図示は省略している。

図 3.9 本格実験の事前設計例 (燃料単位セル構成図および炉心配置図)

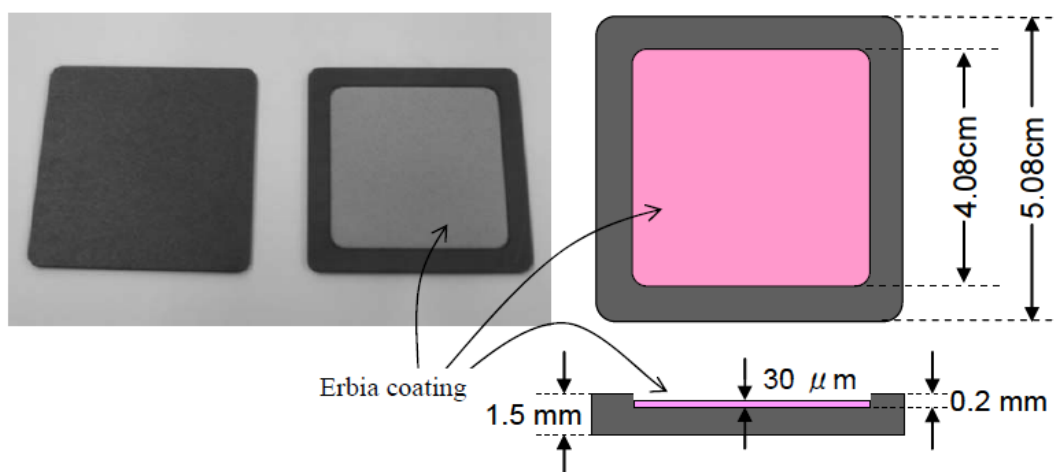


図 3.10 サンプルエルビア板

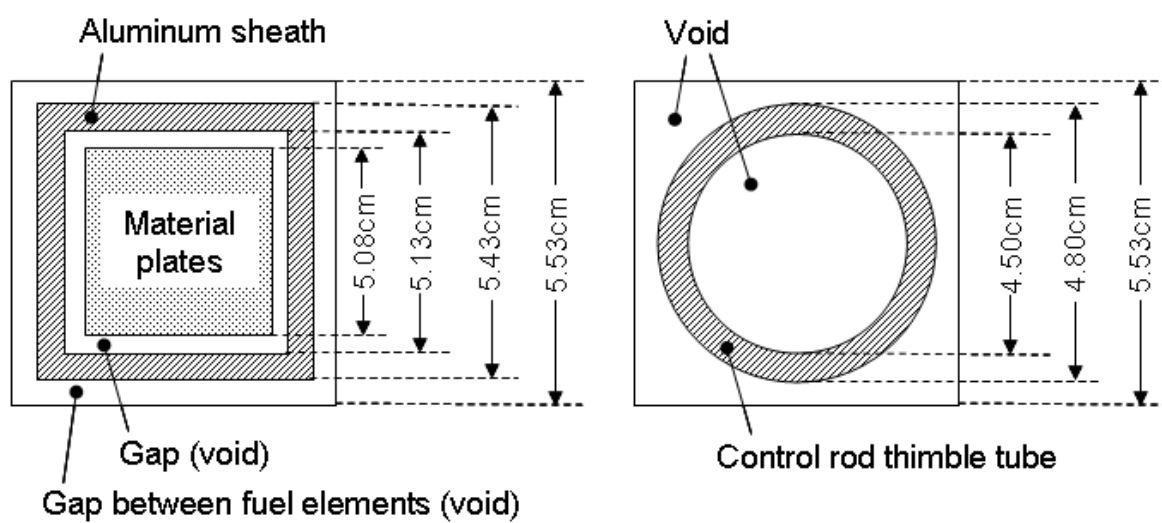


図 3.11 燃料体と制御棒の断面図

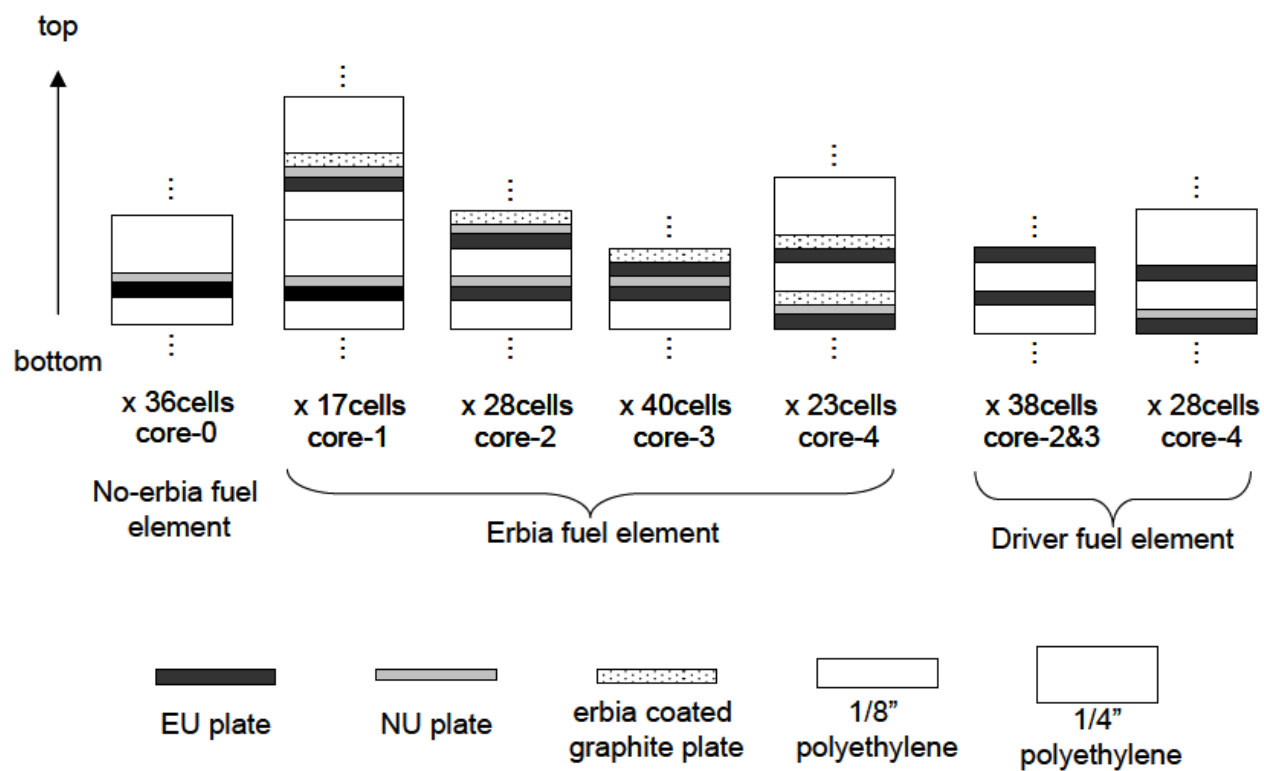


図 3.12 各炉心の燃料体単位セル構成図

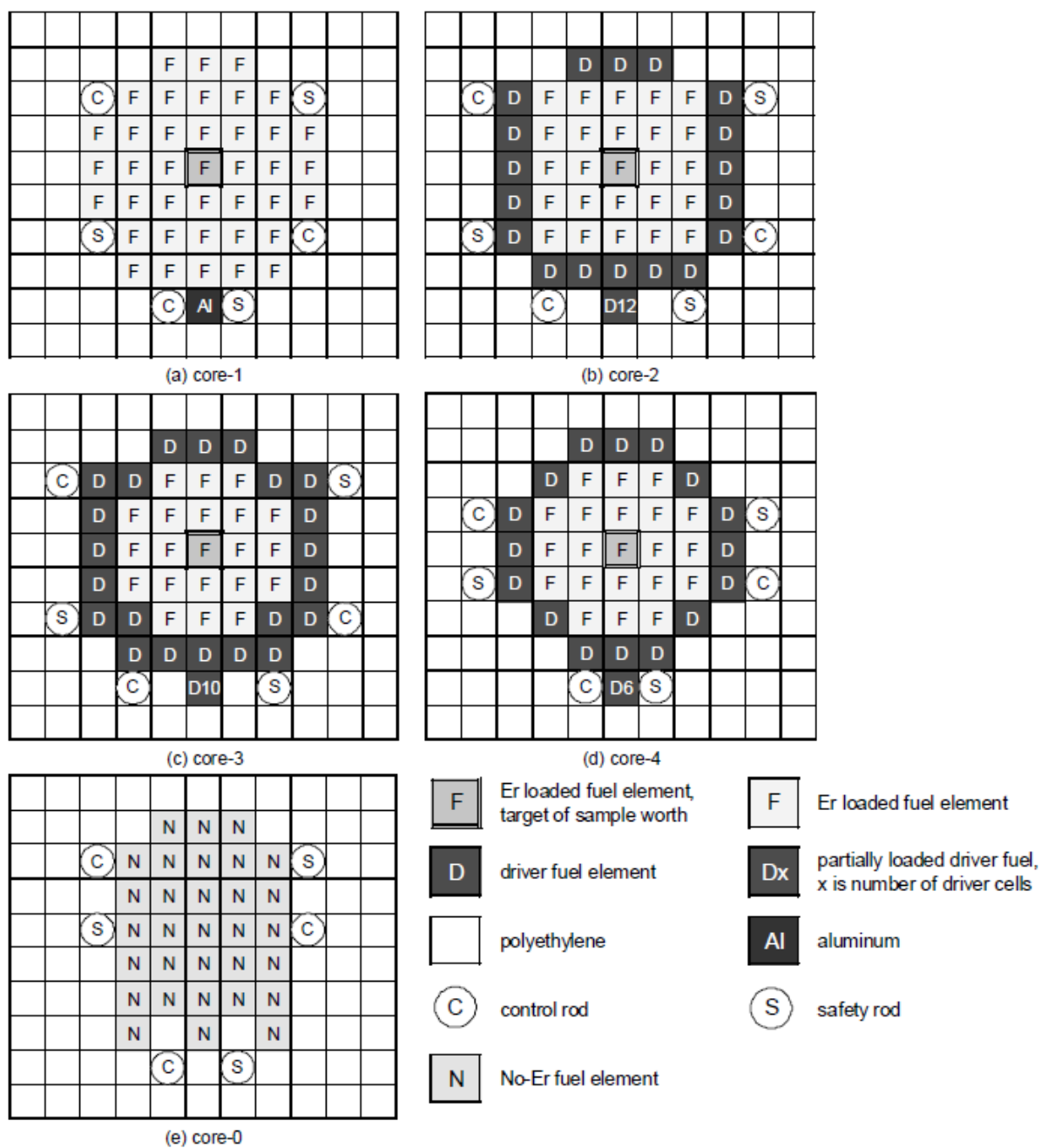


図 3.13 各炉心の燃料体炉心配置図

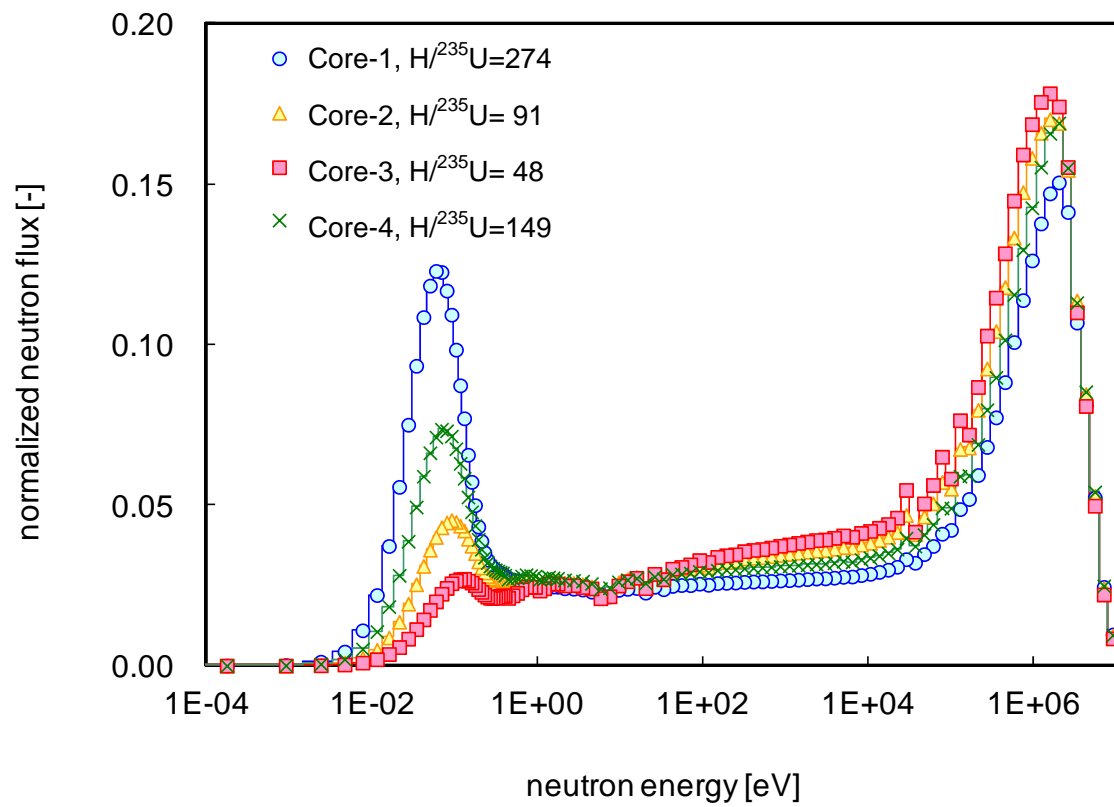


図 3.14 各炉心の中性子スペクトル

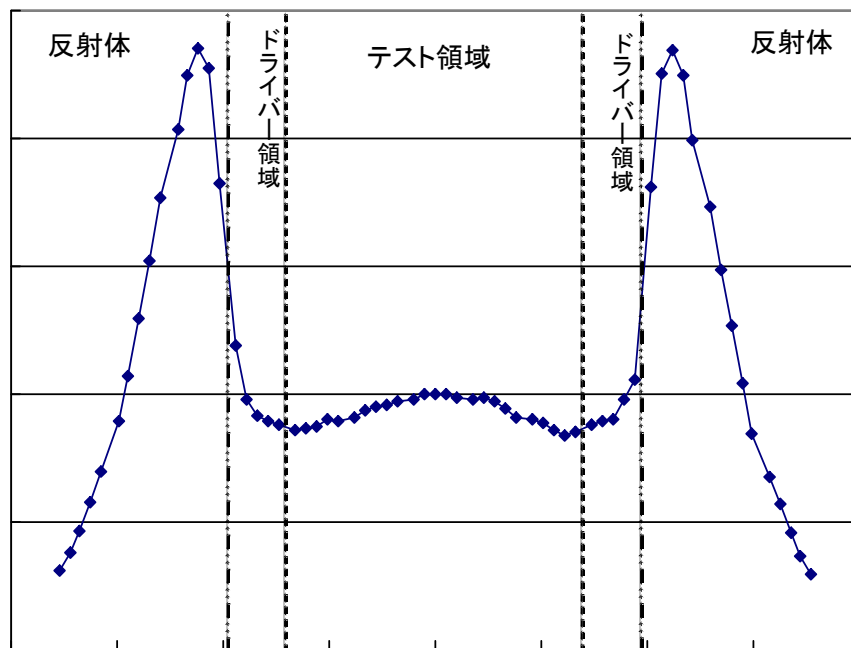


図 3.15 Core-2 における金線反応率分布測定結果（炉中心で規格化）

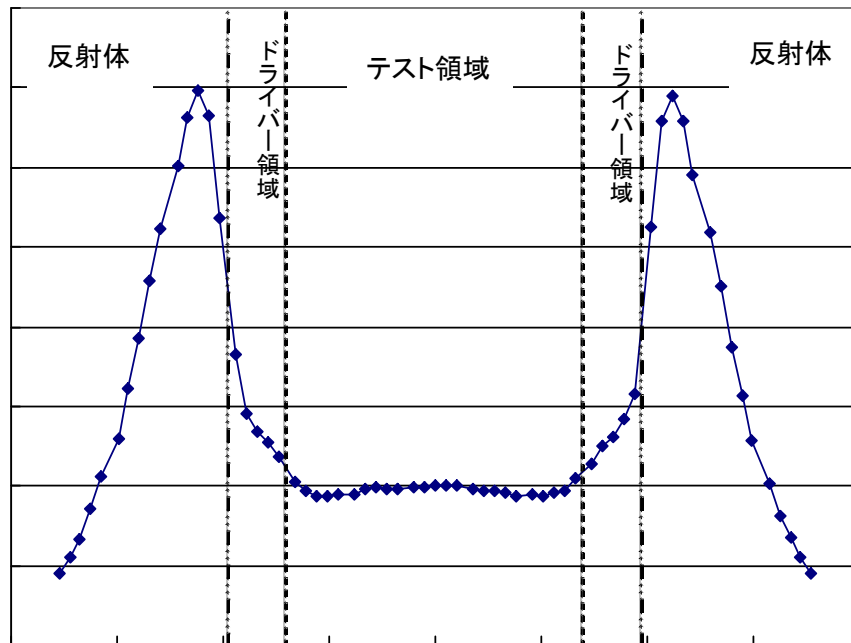


図 3.16 Core-3 における金線反応率分布測定結果（炉中心で規格化）

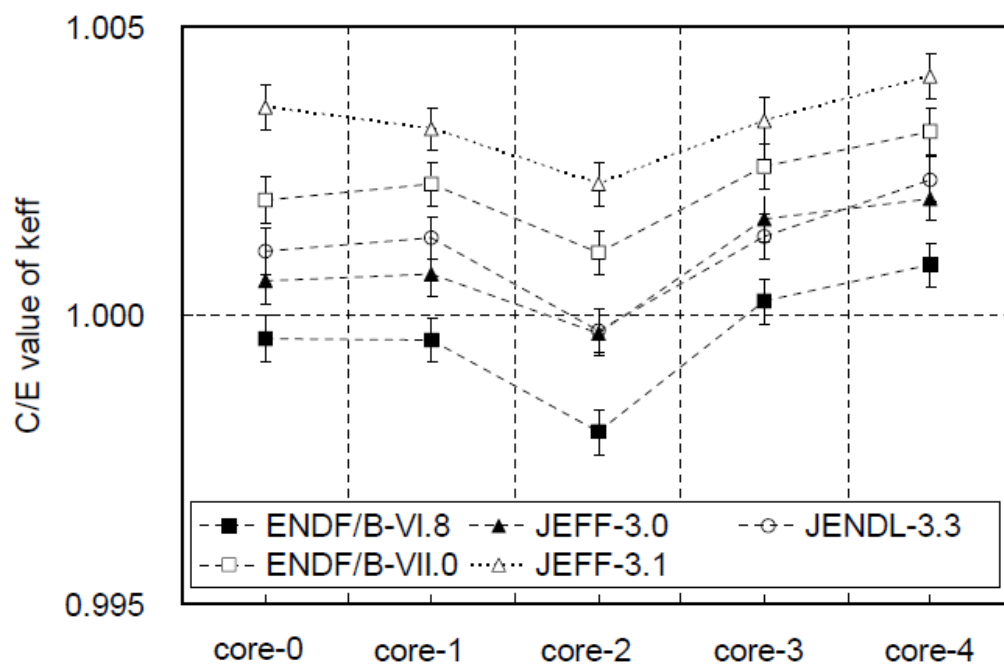


図 3.17 実効増倍率 k_{eff} の計算値と測定値の比較 (MVP コードによる計算結果)

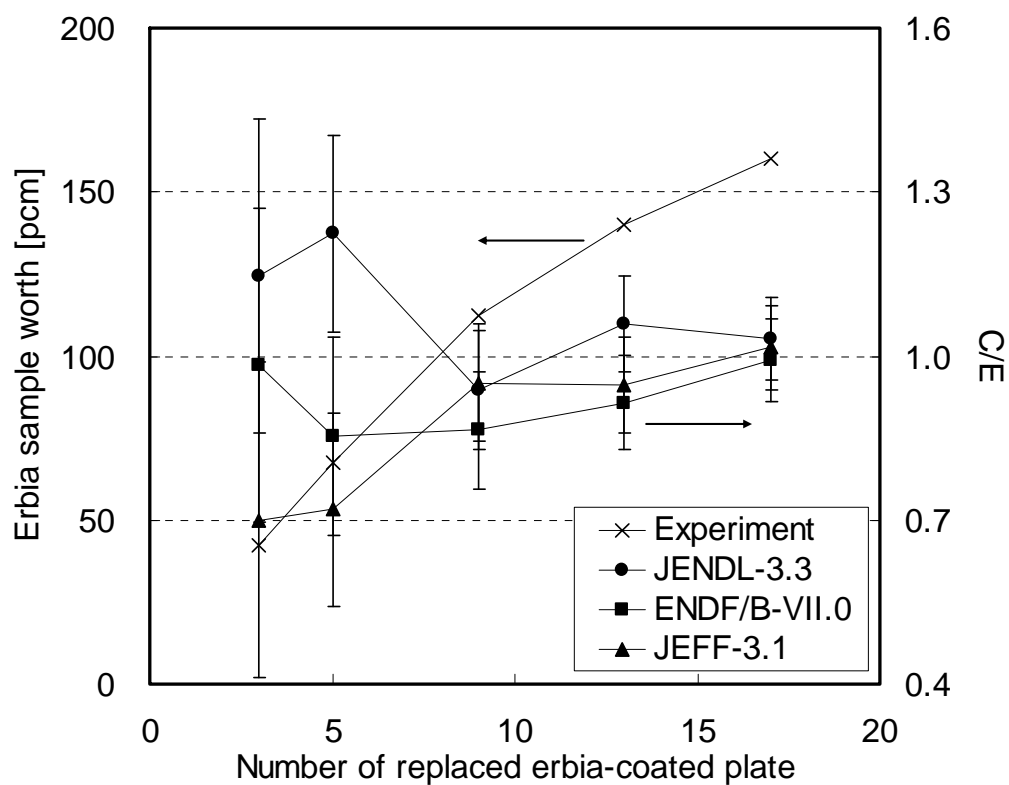


図 3.18 エルビア板置換反応度の測定値と計算値の比較 (MVP コードによる計算結果, Core-1)

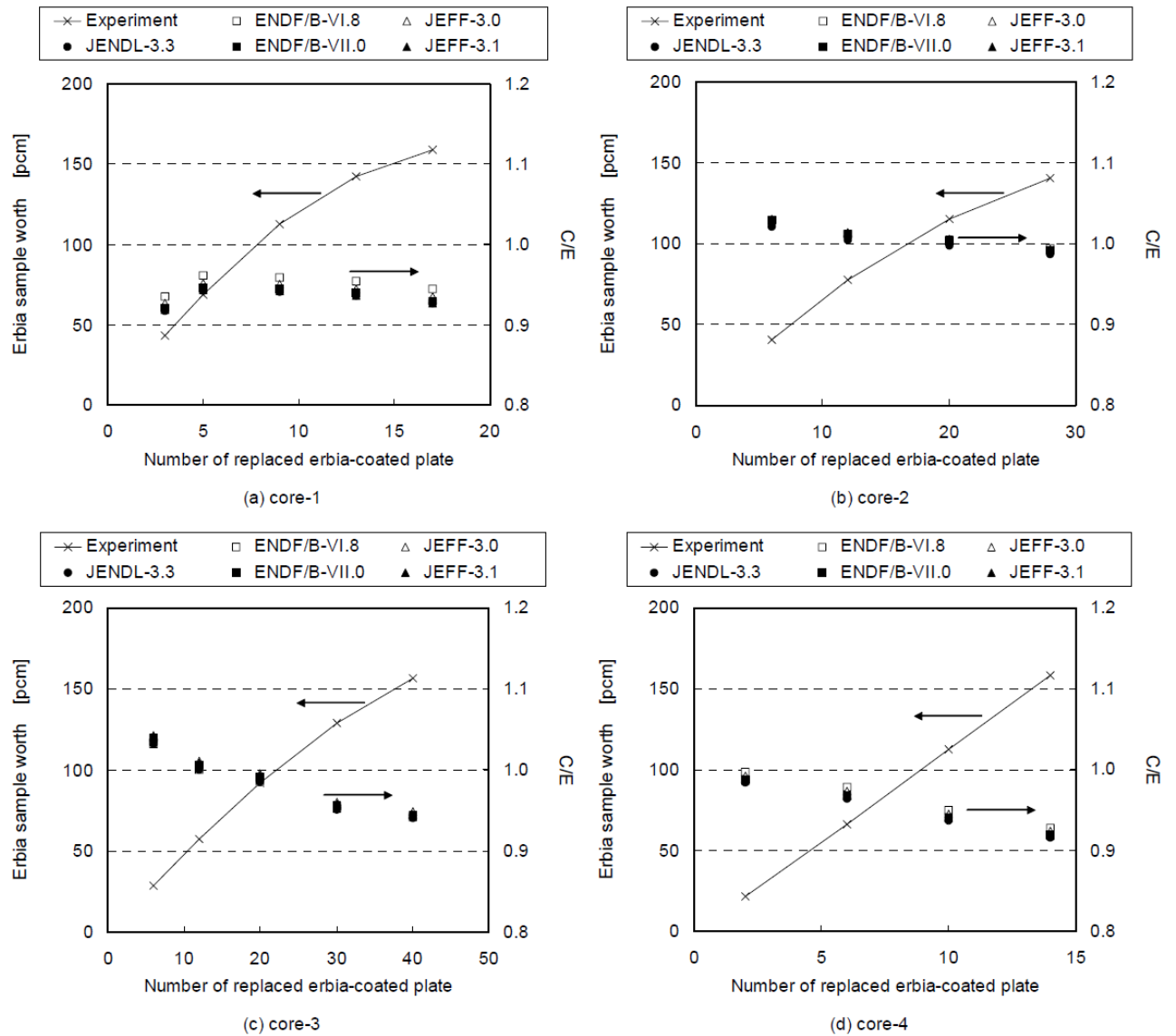


図 3.19 エルビウム板置換反応度の測定値と計算値の比較
(SRAC コードによる計算結果, 各炉心)

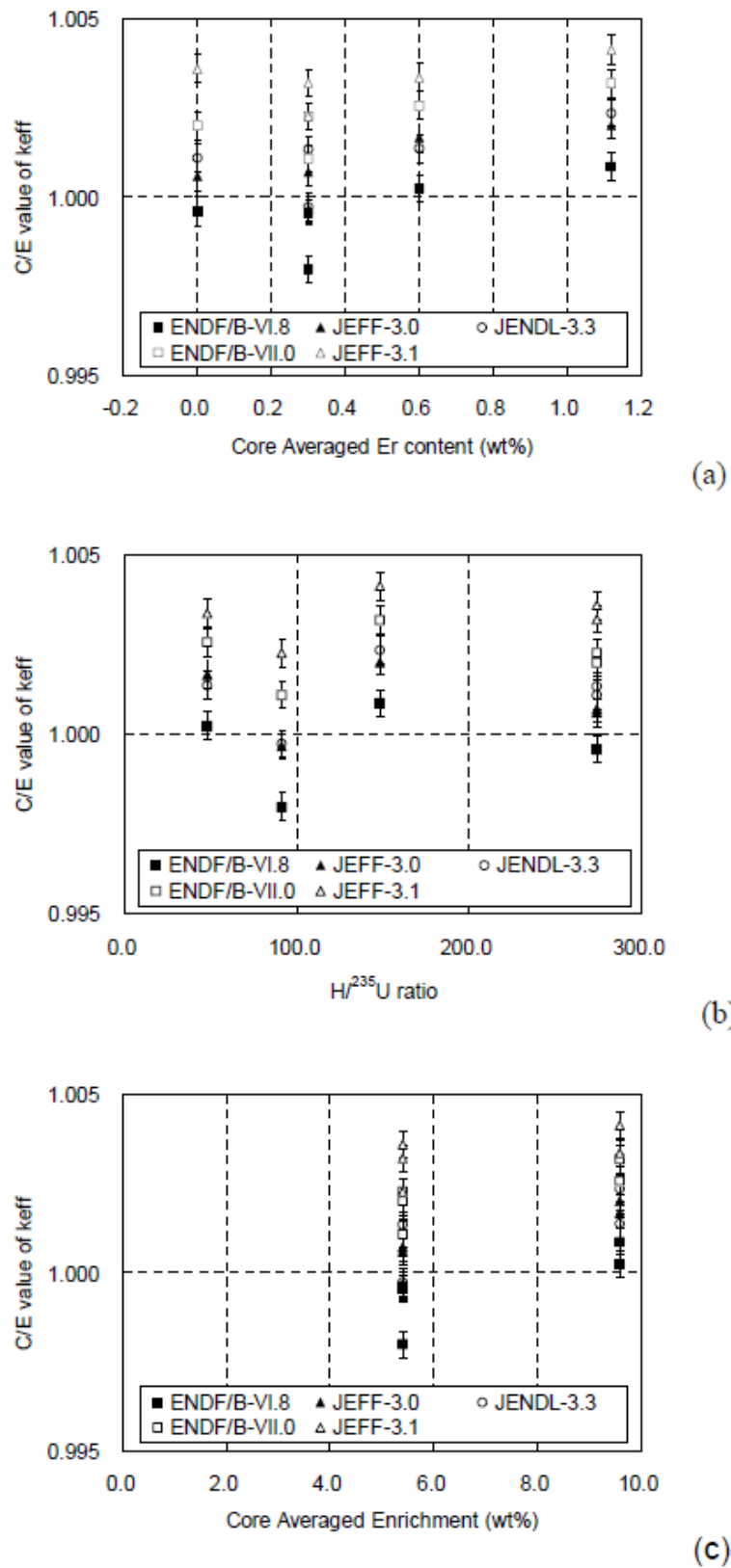
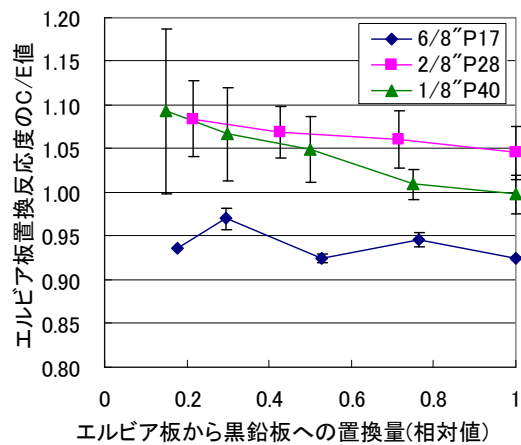
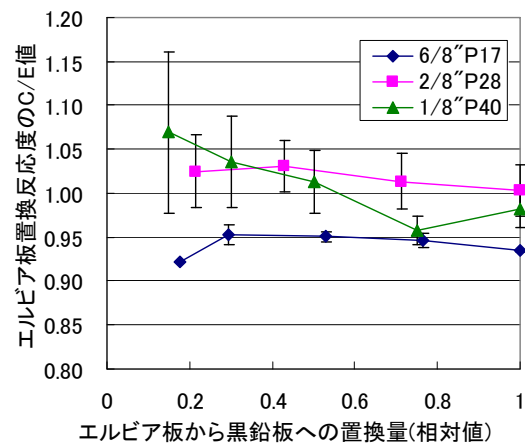


図 3.20 実効増倍率 k_{eff} の C/E の主要パラメータ依存性(MVPコードによる計算結果)

(a)エルビア濃度; (b) $\text{H}/^{235}\text{U}$ 比; (c)ウラン濃縮度



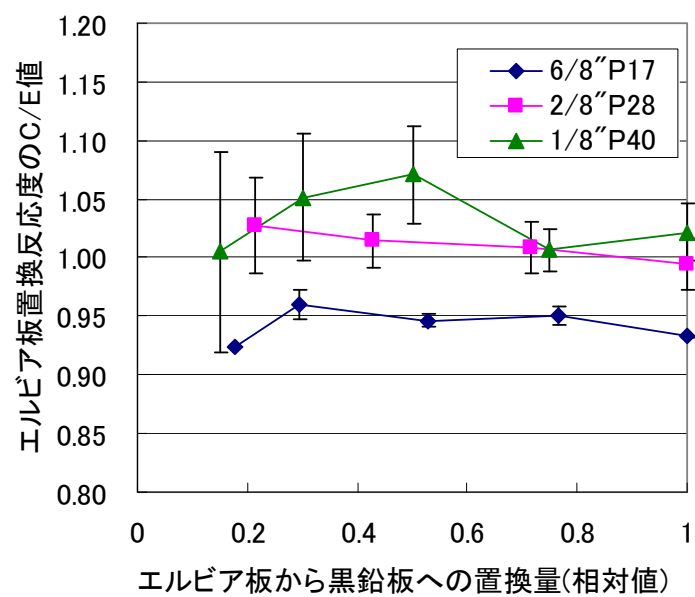
(1) RZ 体系



(2) XYZ 体系

(横軸は中央の燃料要素の全エルビア板を置換した場合を 1.0 に規格化。誤差棒は 1σ)

図 3.21 CITATION によるエルビア板置換反応度の解析値と実験値の比較(C/E 値)



(横軸は中央の燃料要素の全エルビア板を置換した場合を 1.0 に規格化。誤差棒は 1σ)

図 3.22 TWOTRAN によるエルビア板置換反応度の解析値と実験値の比較(C/E 値)

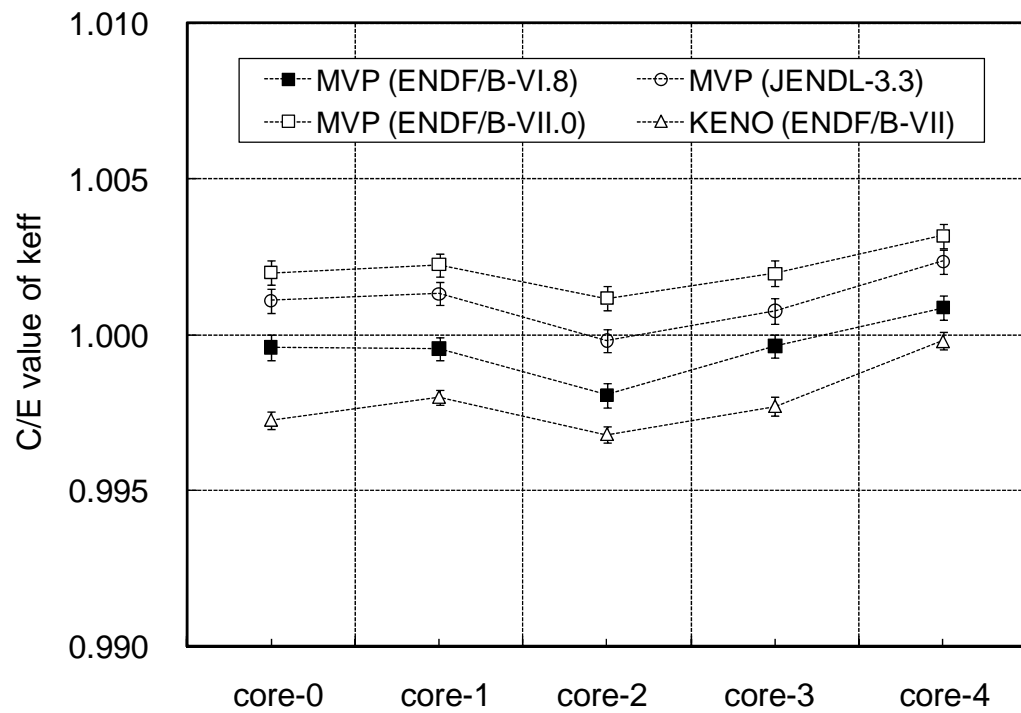


図 3.23 KUCA 臨界実験解析の比較結果（バイアス補正後）

【第 3 章の参考文献】

- 1) L.V.Corsetti, S.C.Hatfield A.Jonsson, "Recent Advances in PWR Fuel Design at ABB-CE," Proc. International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Avignon, France, April 21-24, (1991).
- 2) I. B. Fiero, A. Jonsson, et al., "Status of erbium burnable absorber development at ABB combustion engineering nuclear fuel," Proc. 1994 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, West Palm Beach, Florida, April 17-21, (1994).
- 3) A. Jonsson, J. E. Gunn, "Application of Erbium Burnable Absorbers in the Design and Operation of 18- and 24-month Fuel Cycles," CE-NPSD-796-NP, Trans. of the American Nuclear Society, **73**, 376-377, (1995).
- 4) D. R. Damon, D. C. Morey, "Criticality Safety Limits at 5 to 20% Enrichment," American Nuclear Society Annual Meeting, Nashville, TN, USA, June 7-11, (1998).
- 5) L. E. Paulson, W. C. Peters, "GE Validation to Support Fuel Fabrication up to 10% Enrichment," American Nuclear Society Annual Meeting, Nashville, TN, USA, June 7-11, (1998).
- 6) H. Unesaki, S. Shiroya, "Analysis of KUCA Critical Experiments using MVP Code and JENDL-3.2," Proc. Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology, Long Island, New York, U.S.A., October 5-8, (1998).
- 7) Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori et al., "MVP/GMVP Version 2 : General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods," JAERI 1348, (2005).
- 8) K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko et al., "SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," JAEA-Data/Code 2007-004, (2007).
- 9) K. D. Lathrop, F. W. Brinkley, "Theory and Use of the General Geometry TWOTRAN Program," LA-4432, Los Alamos National Laboratory, (1970).

第4章 エルビアクレジットを用いた臨界安全性評価

4.1 緒言

エルビアクレジットは、濃縮度 5wt%を超えるウラン粉末全てに薄くエルビアを混入させることにより、ウラン燃料の反応度を低下させ、濃縮度 5wt%以下の燃料と同等の臨界安全性を担保するコンセプトである。濃縮度 5wt%超燃料については、1998 年に開催されたアメリカ原子力学会（ANS）の年次大会にて、原子力臨界安全部会（NCSD）主催の特別セッションが開かれ、濃縮度 5wt%超燃料に対する臨界安全性評価について議論されている^{1, 2)}が、未だに実用化はされていない。エルビアクレジットにより、濃縮度 5wt%以下燃料を対象とした既存の燃料インフラを活用し、濃縮度 5wt%超燃料の実用化を推進しようとするのが、エルビアクレジット燃料を導入する目的である。

エルビアはガドリニアの代替としての中性子吸収材として多くの研究が実施されており、米国やロシアの商業用軽水炉にて実際に装荷・使用されている。しかしながら、エルビアクレジットのような、濃縮度 5wt%を超える燃料全体に薄く広く混入させ、濃縮度 5wt%以下と同等の反応度を担保するという研究は実施されていない。特に、ウラン濃縮度と必要なエルビア濃度の相関を検討した例はない。本章の目的はエルビアクレジットとして必要十分なエルビア濃度の決定方法と設計の目安としてのエルビア濃度を提示することである。

従来の臨界安全性評価において、燃焼度クレジットの一種として、可燃性毒物の燃焼を通じた反応度変化を考慮することが IAEA などから提言されている³⁾。これは、使用済燃料輸送容器や再処理施設の受け入れ設備などの臨界設計を、新燃料の反応度ではなく毒物による反応度低下をクレジットとして考慮することにより緩和するコンセプトである。可燃性毒物を用い、その反応度低下をクレジットとして活用し、臨界設計を緩和するという観点ではエルビアクレジットのコンセプトと類似している点がある。が、エルビアクレジットの独創的な点は、主に濃縮度 5wt%超燃料の反応度を 5wt%以下と等価とすることに着眼していること、集合体が形成される以前の形態も考慮しすべてのウラン粉末に毒物を混入すること、である。

エルビアクレジットにおいては、任意のウラン濃縮度に対して、どれほどのエルビアを混入させれば濃縮度 5wt%以下と等価にできるかという、必要かつ十分な、最低エルビア混入量を決定することが必要である。第 2 章の図 2.3 では、濃縮度 6wt%のウラン

燃料集合体全体に 0.2%のエルビアを混入させると、5wt%未満の反応度になることを示しているが、これはあくまでも炉心内のスペクトル場を模擬した無限集合体体系における評価結果である。実際にエルビアクレジットを適用するには、エルビアを混入して以降のあらゆる環境において濃縮度 5wt%燃料と同等以下の反応度であることを担保しなければならない。ここでいう『あらゆる環境』とは、エルビアを混入して以降の燃料サイクルフロントエンドで想定し得る幾何形状，重量，減速材条件などである。当然ながら、各施設，各工程，各設備によって必要十分なエルビア量は異なるが、一度ウラン粉末にエルビアを混入すれば、それ以降エルビアの濃度を各設備に応じて変更させることは現実的ではない。すなわち、あらゆる設備を包絡するエルビア濃度を予め決定しておく必要がある。

一方、各施設，各設備の臨界安全については一義的に事業者がその責任を負っている。このため、あらゆる施設，設備を包絡する必要十分なエルビア濃度の目安を予め定めておき、それに基づいて燃料を設計し、各事業者が自社の設備に対して臨界安全性を評価し、安全性を担保することになる。本章においては必要十分なエルビア濃度の決定に焦点を当て、エルビア濃度決定のための臨界安全性評価について述べる。一方、エルビア入り燃料の核的・機械的安全性については、既報告の幾つかの論文にて成立性を見通しは報告しており^{4,5)}、本研究には含めないものとする。

初めに 4.2 節では評価に用いる設計ツールと臨界安全性評価に用いた解析体系について示す。第 3 章で得られた KUCA 実験の測定値と計算値の比較を行い、設計ツールをエルビア濃度決定に用いることの妥当性を確認する。また、臨界安全性評価の解析体系としては再転換工程直後にエルビアを混入してから原子炉新燃料ピットまでのフロントエンド全体を代表するように選定した。

続く 4.3 節では、上記各解析体系における臨界安全性評価結果を述べる。

そして 4.4 節では各体系毎に得られた濃縮度 5wt%燃料と等価にするためのエルビア濃度を示し、必要十分な最小エルビア濃度の決定について考察する。その結果得られたウラン濃縮度とエルビア濃度の相関図を特に”ECOS (=Erbia COntent for Sub-criticality judgement) 図”と命名した。

なお、臨界安全評価における基本的な考え方，手順，データ等については文献 6,7,8 を参考にした。

4.2 方法

本章では実際の加工施設を想定した臨界安全性評価に焦点を当てる観点から、燃料加工施設や輸送容器の臨界安全性解析に広く一般的に使用されている KENO コード⁹⁾を用いる。KENO コードは SCALE システムの一部として公開されており、臨界安全解析用のツールとして国内外で多くの使用実績のあるコードである。

4.2.1 評価ツール

KENO コードでエルビア濃度を評価するにあたり、KENO コードのエルビアに対する妥当性確認を実施した。対象とする実験データは第 3 章で示した KUCA におけるエルビア燃料実験である。KUCA 実験では様々なウラン濃縮度、エルビア濃度、減速材割合について実験が実施されており、エルビアクレジットの評価に用いる計算コードの妥当性確認に適している。

KUCA 実験の詳細は第 3 章にて既に述べたが、実験を行った各炉心の特徴を表 4.1 に、炉心概要を図 4.1 に、燃料配置を図 4.2 にそれぞれ再掲する。KENO コードにて各炉心の体系を模擬し、炉心臨界性の解析を行った。KENO コードによる実効増倍率の計算値と測定値の比較結果を図 4.3 に示す。図 4.3 は計算値と測定値の比 (C/E) を示したものである。KENO コードの計算においては、ヒストリ数 10000、バッチ数 10100、捨てバッチ 100 で計算し、実効増倍率に対する統計誤差は 1σ で $0.01\% \Delta k$ である。

図 4.3 には、比較のため、第 3 章で示した連続エネルギーモンテカルロコード MVP¹⁰⁾の解析結果のうち、JENDL-3.3, ENDF/B-VI.8, ENDF/B-VII.0 の 3 つのライブラリの計算結果も併せて示している。図中で示した誤差バーはいずれも 3σ の値である。

図 4.3 より、実効増倍率の C/E はいずれのケースにおいても 0.997~1.003 の範囲内で一致している。エルビアを含む KUCA 実験における KENO コードの C/E は MVP コードの結果と同等であり、妥当であると言える。KENO においては、Core-0 から Core-4 へとエルビア濃度が増加するにつれて若干計算値が測定値よりも高くなる傾向もみえる。Core-0 から 4 となるにつれエルビア濃度も増加しているため、エルビア濃度依存の誤差がある可能性があるが、エルビア濃度以外の条件も炉心毎に変化しており、元々非常に軽微な差異であるため特にエルビアに起因するとは特定できない。

また、仮にこのようなエルビア濃度依存性の誤差傾向があった場合、これは計算値がエルビアの反応度を過小評価している傾向であり、必要十分な最小のエルビア濃度を算出するにあたってはエルビア濃度を高く評価する、即ち安全側の評価となる。

以上の考察により、本研究に KENO コードを使用するのは妥当であると判断し、以降の臨界安全性評価は KENO コードを用いて実施することとする。なお、KENO コードを用いた KUCA 実験解析については、燃料の製造公差や実験の再現性なども含めて詳細な検討を実施済である¹¹⁾。

4.2.2 評価体系

第 4.1 節で述べたとおり、エルビアクレジットにおいては、任意のウラン濃縮度に対して、どれほどのエルビアを混入させれば濃縮度 5wt%以下と等価にできるかという、必要かつ十分な最低エルビア混入量を決定することが必要である。ここでエルビアクレジットを適用するには、エルビアを混入して以降のあらゆる環境において濃縮度 5wt%燃料と同等以下の反応度であることを担保しなければならない。ここでいう「あらゆる環境」とは、エルビアを混入して以降の燃料サイクルフロントエンドで想定し得る幾何形状、重量、減速材条件などである。

エルビアクレジットを用いた典型的なシナリオでは、 UO_2 の再転換後、粉末となった燃料にエルビア粉末を適量混入させることが妥当である。よって考慮すべきはフロントエンドにおける再転換工程以降、発電所の新燃料ピットまでとなり、これらの環境を包絡させることが必要である。この観点から、臨界評価の対象として下記の 3 つの体系を選定した。

- ・ 単純形状：典型的な減速状態、基本的な臨界特性評価
- ・ 水分制限付きの大型体系：大きな体積を持った単一体系
- ・ 燃料保管ラックの燃料集合体：多重かつ無限配置の集合体体系

である。

1) 単純形状

球、平板、円筒の単純形状は、体積制限や寸法制限値を決定するために一般に用いられている体系であり、臨界安全解析における典型的かつ基本的な形状である。臨界安全性評価においては、個々の設備は単一ユニットの組み合わせとして表現されるが、それら単一ユニットは単純形状として評価される。つまり、単純形状がほとんどの設備を構成する基本単位として設備の臨界安全性評価が実施される。本研究で対象とする単純形状では、燃料領域は水減速材で取り囲まれ、燃料は UO_2 と水が均質に混合されたものとして扱う。

臨界安全上の制御パラメータとして、球体系においては球半径、板状体系においては板厚さ、円柱体系においては円柱半径をサーベイし、実効増倍率が許容限界の範囲内で最大値（=0.98）となるよう決定した。ウラン燃料密度や減速材比（ $H/^{235}\text{U}$ ）も物理的に取り得る範囲内で実効増倍率が最大となるように決定した。このようにして最適な条件が決定された後、この最適条件に固定したままでウラン濃縮度を増加させ、このときの反応度が濃縮度 5wt%のものと等価になるエルビア濃度をサーベイした。

なお、球、平板、円筒の各体系ともに、非均質系に比べて均質系が保守的、即ち必要最小量のエルビア添加量は均質系の方が若干高い結果となる。このため、最適条件のサーベイおよびエルビア濃度の算出においては、均質系のみで評価すれば十分であることを確認している。

2) 水密条件付 大型球体系

もう一つの単一ユニットとして、水密管理された大型球体系を選定した。概要を図 4.4 に示す。

ここでは水密条件（ $H/U \leq 1$ ）が付与されたことにより、減速条件単純形状よりも多量のウラン粉末を取り扱うことのできる体系である。これは燃料のフロントエンドにおいて再転換工程以降で最も大量のウラン粉末を扱う設備を想定しており、燃料粉末のブレンダーなどに相当する。体系内は水密管理されているものの、そのような体系が水没した状態を想定し、周囲は無限水反射体で囲まれた状態とする。燃料は球体系でウランと水が均質に混合している状態を考慮する。具体的には、現実的な範囲として以下を想定した。

- ・ 水密条件：水素対ウランの原子数比 $H/U \leq 1$
- ・ 粉末密度： $\text{UO}_2 \leq 3.5\text{g/cm}^3$
- ・ 球の体積：800 リットル（半径約 58cm）

上記の条件下にて、濃縮度 5wt%のウラン燃料の未臨界度が最小（反応度が最大）になる条件をサーベイし、最適な条件を決定する。この最適条件に固定したままでウラン濃縮度を増加させ、このときの反応度が濃縮度 5wt%のものと等価になるエルビア濃度をサーベイした。

3) 燃料集合体貯蔵ラック

3 つ目の評価体系としては、単一ユニットではなく複数ユニットの多重体系を選定した。完成した燃料集合体が多数（ここでは評価モデルとして無限に）配列された体系で

あり、新燃料貯蔵庫を想定している。他の 2 つのケースとの大きな違いは、複数ユニットであることによるユニット間の相互作用の存在である。このため、実際の燃料貯蔵庫においては燃料集合体間の核的相互作用を弱めるために、中性子吸収材を含むほう素入りステンレス鋼などを用いて貯蔵ラックが構成されるが、本研究の評価においては敢えて相互作用が顕在化する条件を設定し効果を確認することとした。

燃料集合体が貯蔵される貯蔵庫はほう素入りのステンレス鋼で構成される。実際の燃料集合体貯蔵庫はラックのピッチ、構造材の厚さ、材質、燃料集合体と構造材とのギャップ、燃料集合体の種類・大きさ、など様々な要因で未臨界度が変化する。最適な減速条件を得るため、水減速材の水密度は真空から冠水（0～100%）まで変化させて計算を実施した。

本研究では、図 4.5 に示すように、WH 型 PWR 用 17x17 燃料を用い、図に示した間隔で無限に燃料集合体が存在していると仮定する。この体系は必ずしも実在の燃料貯蔵庫に対応するものではないが、前述の通り体系間の相互作用の影響を検証するのに適した体系となっている。燃料の濃縮度は 5wt% とし、ペレット密度は 100%TD と想定、燃料集合体の構造材、即ちグリッド、ノズル、プレナムなど燃料棒の被覆管を除き全て無視している。径方向については無限に同一の体系が繰り返されるとしており、軸方向については燃料の上部と下部に水反射体があると仮定している。

上記の条件下にて、濃縮度 5wt% のウラン燃料の未臨界度が最小（反応度が最大）になる条件をサーベイし、最適な条件を決定する。この最適条件に固定したままでウラン濃縮度を増加させ、このときの反応度が濃縮度 5wt% のものと等価になるエルビア濃度をサーベイした。

4.2.3 評価手順

解析の第 1 ステップとして、前節で示した各体系において濃縮度 5wt%、エルビア混入無しの燃料にて無限増倍率を評価する。その際、燃料半径、反射体厚さ、水密度を変動させ、反応度が最大となるパラメータをサーベイする。

続く第 2 ステップでは、濃縮度 5wt% 超の燃料にてステップ 1 と同様に反応度が最大となるパラメータをサーベイし、その状態でステップ 1 の無限増倍率と等しくなるようにエルビア濃度をサーベイする。こうして、各体系で最大の最適反応度となる時点で濃縮度 5wt% 以下と同等とするために必要十分な最低量のエルビア濃度を決定していく。最終的にそれら全てのエルビア濃度を包絡する値を必要最低量のエルビア濃度とする。

本研究では、通常時から外れた状況や事故時などは明示的には考慮していない。しかしながら、あらゆるスペクトル変化を考慮して反応度が最も厳しくなる最適減速材密度をサーベイしていることから、異常時や事故時のスペクトルも結果的に考慮できていると考えられる。

また、本研究の目的は濃縮度 5wt%の燃料と等価になるエルビア濃度を求めることであり、未臨界度を最小化するエルビア量を求めることではない点に留意すべきである。

4.3 結果

4.3.1 臨界安全性評価

1) 単純形状

球、平板、円筒の各体系において、各種寸法等のサーベイ計算により未臨界判定図^aを求めた。得られた未臨界判定図を図 4.6 に示す。このうち、未臨界判定図のサーベイ計算結果については代表として球体系の結果を表 4.2 に示す。

表 4.2 から、当該評価は最適減速でのサーベイ結果であり、 $H/^{235}U$ は濃縮度とともに増加し、5~10wt%に対して約 120~260 となっていることが分かる。また、図 4.6 の結果から、5wt%燃料と等価反応度にするために必要となるエルビア濃度は、ウラン濃縮度に対してほとんど直線的に増加することが分かる。また、今回得られた結果の中で注目すべき点は、球、平板、円柱の各体系での評価結果はほぼ等しく、結果として得られるエルビア量に大差がないことである。このことから、単純形状の単一ユニットにおいては、均質球体系での未臨界判定図を代表的に用いることが妥当であることが判明した。

2) 水密条件付大型球体系

水密条件付き大型球体系については、まず濃縮度 5wt%で UO_2 粉末密度 3.5, 3.0, 2.5, 2.0g/cm³ に対して H/U を変化させた場合の反応度変化を図 4.7 に示す。その結果、反応度が常に最大であった UO_2 粉末密度 3.5 g/cm³ について、濃縮度 6, 7, 8, 9, 10 wt%のウラン粉末に対して、 H/U を変化させた場合の反応度変化を図 4.8 に示す。図 4.8 より、いずれの濃縮度においても H/U が最大の 1.0 の場合に系の増倍率が最大となることがわかる。

これより、 UO_2 粉末密度の増加、 H/U の増加、および、濃縮度の増加の何れに対しても系の増倍率は単調に増加することが確認され、このケースでの系の最大の増倍率は

^a 5wt%超濃縮度において、濃縮度 5wt%と等価な臨界安全性（増倍率 0.98 以下）となる濃縮度とエルビア添加量の領域を示す図。

UO₂ 粉末密度 3.5 g/cm³ , H/U が 1.0 のとき, 0.874 になるという結果が得られた。

これを踏まえ, 次に濃縮度 5wt%超に対して, 増倍率が濃縮度 5wt%のときの最大値 (=0.874) となるようにエルビア添加量を決定した。各濃縮度について, H/U に対するエルビア添加量の計算結果を図 4.9 に示す。

図 4.9 より, 濃縮度 5wt%超ウラン燃料の増倍率が水分変化に対して単調に増加する傾向を反映して, 5wt%以下と等価とするための必要エルビア添加量も水分変化に対して単調に増加していることがわかる。ただし, 図 4.8 が各濃縮度毎にほぼ平行な挙動をしてしていたのに比べ, 図 4.9 は濃縮度が高くなるほど傾きが急になる傾向を示している。これは, 濃縮度が高くなるほど中性子スペクトルが硬化し, エルビアの実効的な吸収率が減少するため, 必要となるエルビア量が増加するためと考えられる。

当該ケースにおいて各濃縮度毎の必要エルビア濃度の包絡値は図 4.9 中で破線で囲んだ値となり, 上記の考察から濃縮度が高くなるほど必要エルビア濃度が増加するやや下に凸の挙動を示すことが分かった。

3) 燃料集合体貯蔵ラック

集合体貯蔵ラックにおいて, 濃縮度 5, 6, 7, 8, 9, 10wt%について, いずれもエルビア無しの状態での増倍率の変化を図 4.10 に示す。図 4.10 においては, 体系全体の水分を 0 から 100%まで一様に変化させ, 増倍率の変化を評価している。

まず図 4.10 からわかるのは, 濃縮度 5wt%の時の最大増倍率は, 水密度が 100%, 即ち冠水状態の評価結果であり, 臨界安全下限値 (=0.95) よりも十分低い 0.937 である。

また, 他の単一ユニットの結果にない特徴的な傾向として, 水密度の低い側でピークが発生していることである。これは, 集合体ラック体系が繰返し形状であるために, 水分が低いときに集合体間の核的相互作用が高まるためである。図 4.10 における濃縮度毎の増倍率最大値及びその水分と, 冠水時の増倍率を表 3.3 に示す。

図 4.10 および表 4.3 より, 濃縮度の増加とともに増倍率は増加するが, 冠水時(水分 100%)よりも水分の少ない領域(水分 10~13%)での増加割合が大きく, 濃縮度 5wt%では冠水時と少水分時では冠水時の増倍率が大きかったが, 濃縮度の増加とともに少水分領域の増倍率が最大となっていることが分かる。つまり, 濃縮度が高い場合には必ずしも水分最大(冠水状態)で増倍率最大値を与えるとは限らないことになる。

増倍率が水分の少ない領域でピークを示すのは, 繰返し形状における核的相互作用のためであるが, 濃縮度の増加と共にスペクトルは硬くなり, ピーク時の相互作用の高

まりによる増倍率への影響が顕著になったためと考えられる。また、同じ理由により、ピーク発生時の水分は、濃縮度の増加と共に僅かに減少する傾向、即ち、実効増倍率のピークが低水分側にシフトする傾向を示したと考えられる。

次に、濃縮度 5wt%超の燃料に対して、増倍率が濃縮度 5wt%の時の最大値(=0.937)と等価となるようにエルビア添加量を決定する。各濃縮度について、得られたエルビア添加量の計算結果を図 4.11 に示す。図 4.11 より、エルビア添加量も水分の低いときにピークを生じているが、増倍率と比較して、濃縮度の増加とともにピークはより水分の低い側へとシフトし、より急峻なピークの形状を示していることが分かる。これは、水分が低くなると中性子スペクトルが硬くなり、実効的なエルビア吸収反応が小さくなるためである。

図中には、各濃縮度毎の必要エルビア濃度の包絡値を破線で示しているが、濃縮度が高くなるほど必要となるエルビア添加量が急激に増加していることが分かる。このため、濃縮度と必要エルビア濃度の相関は濃度が高くなるほど傾きが急峻となる下に凸の挙動を示すことが分かった。

これは仮に、濃縮度 5wt%以下を前提として、冠水状態時に最大増倍率となるように設計された繰り返し形状の施設があった場合、濃縮度 5wt%以下と同様に冠水時のみに着目して必要となるエルビア濃度を算出すれば、非安全側の結果となることを示唆している。即ち、エルビアクレジットを導入する際には、特に繰り返し形状となる体系においては、予断を排して包絡的なエルビア濃度を評価する必要があることに留意するべきである。

さらに、繰り返し形状において現れる低水分側でピークを生じる場合については、水分の計算点が粗いと、計算点がピーク時とずれることによって、非安全側評価となる可能性がある。エルビア添加量のピークが急峻であることに留意して、水分の計算点を細かく設定することが必要である。

なお、この低水分密度におけるピークを低減するためには、体系間の相互依存効果を低減させることが有効である。その方策としては、①構造材中の中性子吸収材の体積または密度を増加させる、②体系間の距離を増大させる、などが考えられる。濃縮度 5wt%超燃料が実際に導入される場合には、そのような対策についても十分に考慮されるべきであろう。

参考までに、規制当局によっては燃料の乾式保管施設においては湿式保管施設よりもより高い増倍率、即ちより浅い未臨界度を許容している場合もある。そのような場合に

は、水分が低い条件時の必要なエルビア濃度をより低く設定することが可能となる。エルビアクレジット導入時にはそのような規制の違いを考慮して最適な運用法を検討する価値はあるが、本研究においてはあくまでも濃縮度 5wt%と等価な増倍率を与えるようにエルビア濃度を設定することとしている。

4.4 考 察

4.4.1 エルビア添加量の算出—ECOS 図

以上より、5wt%以上のウラン濃縮度に対して、5wt%と等価とするために必要なエルビア所要量をまとめると、図 4.12 が得られる。これらは、図 4.6 の結果および、図 4.9、図 4.11 に示した破線で囲んだ値を、濃縮度に対してプロットしたものである。

この図は、『未臨界度を判定するためのエルビア濃度 (Erbia COntents for Subcriticality judgment)』という意味合いから、ECOS 図と命名した。この図は各体系における必要最低量のエルビア濃度を示したものであり、これらの包絡値以上のエルビアを混入すれば、反応度は 5wt%以下の燃料と同等以上の未臨界度が担保され、濃縮度 5wt%の燃料と同等に取り扱うことができることを示している。

図 4.12 において、集合体ラック体系については濃縮度の増加とともにエルビア添加量が急激に増加しているのは、前述の通り繰返し形状における相互作用に起因した特徴である。

図 4.12 より、濃縮度 7wt%以下の場合には、ラック体系でみられる低水分側のピークも顕在化しないため、単純形状の評価にて必要なエルビア濃度の評価が可能である。一方、濃縮度 7wt%を超える場合はラック体系で見られる低水分側のピークが顕在化するため、体系間の相互作用を考慮してエルビア濃度の評価を行うことが必要である。

さらに、元々未臨界度が最低下限増倍率(=0.95)に対して非常に深くなるように設計されている大型体系では、濃縮度 5wt%と等価とするためのエルビア濃度も他の体系と比べて十分低い値となる。即ち、このような大型体系での評価は必要なエルビア濃度の決定に関しては必要ないと言える。ただし、もし体系の増倍率が最低下限増倍率(=0.95)に対して余裕が少ない場合は、評価対象に加えるべきである。

なお、本稿では詳細に述べないが、既に商業用 PWR を対象にエルビアクレジットを用いた燃料集合体の核的成立性評価を実施済^{12,13)}である。それによると、濃縮度 6wt%の燃料全体に対して、エルビアを 0.4wt%均一に混入させることで、その燃料だけで他

の燃料を用いることなく PWR の平衡炉心が成立することを確認している。今回得られた ECOS 図（図 4.12）によると、ウラン濃縮度 6wt% のとき、未臨界度を担保するために必要となるエルビア濃度は約 0.3wt% であるため、上記に示した燃料設計は臨界安全性の観点からも成立すると言える。即ち、エルビアクレジットを用いることにより、濃縮度 5wt% 超燃料のメリットを有しつつ、濃縮度 5wt% 以下と等価な臨界安全性の燃料が炉心設計の観点からも十分成立することになる。

4.5 まとめ

エルビアクレジットは、濃縮度 5wt% を超えるウラン粉末全てに薄くエルビアを混入させることにより、ウラン燃料の反応度を低下させ、濃縮度 5wt% 以下の燃料と同等の臨界安全性を担保するコンセプトである。エルビアクレジットにより、濃縮度 5wt% 以下燃料を対象とした既存の燃料インフラを活用し、濃縮度 5wt% 超燃料の実用化を推進しようとするのが、エルビアクレジット燃料を導入する目的である。このため、エルビアクレジットにおいては、任意のウラン濃縮度に対して、どれほどのエルビアを混入せれば濃縮度 5wt% 以下と等価にできるかという、必要かつ十分な、最低エルビア混入量を決定することが必要である。本章ではエルビアクレジットとして必要十分なエルビア濃度の決定方法と設計の目安としてのエルビア濃度を提示することを目的として評価を実施した。

まずは評価に用いる設計ツールの妥当性を確認するため、3 章で示した KUCA 実験を対象に、測定値と計算値の比較を行い、設計ツールをエルビア濃度決定に用いることの妥当性を確認した。

次に、臨界安全性評価に用いた解析体系について、再転換工程直後にエルビアを混入してから原子炉新燃料ピットまでのフロントエンド全体を代表するように選定した。評価対象には、単純形状との比較に留意し、減速条件付き大型容器および燃料集合体保管ラックが選定された。燃料密度や水分含有量などに関して最適条件（増倍率の最大値を与える条件）である単純形状の形状寸法が小さいことに対して、減速条件付き大型容器は、実機加工施設の燃料密度や水分設定により形状寸法を大きくしたものである。また、これらはいずれも水反射体付きの、所謂、孤立した体系である。これに対して、燃料集合体保管ラックは、ラックに収納された燃料集合体の繰返し構造であることを特徴としている。

体系毎に得られた濃縮度 5wt% 燃料と等価にするためのエルビア濃度を示し、必要十分な最小エルビア濃度の決定について考察した。各評価対象の濃縮度 5wt% 超に対して、

濃縮度 5wt%と等価な臨界安全性となるエルビア添加量を求めた。結果として得られた図の曲線の上側は未臨界と判定されることから、当該図を ECOS 図 (**E**rbia **C**Ontent for **S**ub-criticality judgment diagram : エルビア添加量に関する未臨界判定図) と命名した。

得られた ECOS 図より、濃縮度 7wt%まではいずれの複雑形状も、未臨界となるエルビア所要量は単純形状と同等あるいはそれ以下であることが分かった。濃縮度 7wt%以上においては、減速条件付き大型容器は単純形状と同等であるが、集合体ラック体系については急激に増加し、単純形状を上回った。これは、体系間の中性子相互効果が存在する形状に起因した特徴と考えており、ECOS 図の作成において注意を要するものである。

評価によって得られた ECOS 図より、現行規制下の加工施設で未臨界性を担保するためのウラン濃縮度とエルビア添加量の組み合わせを判定できる。更には、ECOS 図を作成する上での複雑形状特有の留意点が明らかとなり、エルビアクレジットの臨界安全性評価手法として、貴重な知見を示した。

なお、既に実施した核設計パラメータサーベイの結果から、濃縮度約 6wt%に対してエルビア添加量約 0.4wt%とすることが有効となったが、これは ECOS 図における未臨界領域に含まれている。従って、炉心核特性上良好な燃料仕様について、既存の臨界安全管理下で製造可能であり、経済性と安全性が整合することが示されている。

表 4.1 KUCA 臨界実験における炉心特徴の比較

Case	Average enrichment	Average erbia content ^{*1}	H/ ²³⁵ U	Remarks
core-0	5.4 wt%	---	274	Reference No erbia core
core-1	5.4 wt%	0.3 wt%	274	Entirely erbia loaded core Very soft spectrum
core-2	5.4 wt%	0.3 wt%	91	Zone type core with driver Simulate PWR spectrum
core-3	9.6 wt%	0.6 wt%	48	Zone type core with driver Harder spectrum
core-4	9.6 wt%	1.12 wt%	148	Zone type core with driver Higher Er content

*1) Erbia / U-total

表 4.2 均一球体系における未臨界判定サーベイ計算結果

Enrichment (wt%)	Erbia content (wt%)	Powder density (g/cm ³)	H/ ²³⁵ U
5	0.00	2.22	118
6	0.29	1.69	150
7	0.58	1.64	175
8	0.89	1.47	204
9	1.19	1.32	233
10	1.51	1.16	263

表 4.3 燃料集合体ラック体系における増倍率計算結果（エルビア無し）

Enrichment (wt%)	Maximal k_{eff}	Corresponding water density (%)	k_{eff} at 100% water density
5	0.937	100	0.937
6	0.979	12	0.964
7	1.017	12	0.985
8	1.051	11	1.001
9	1.080	11	1.015
10	1.108	10	1.026

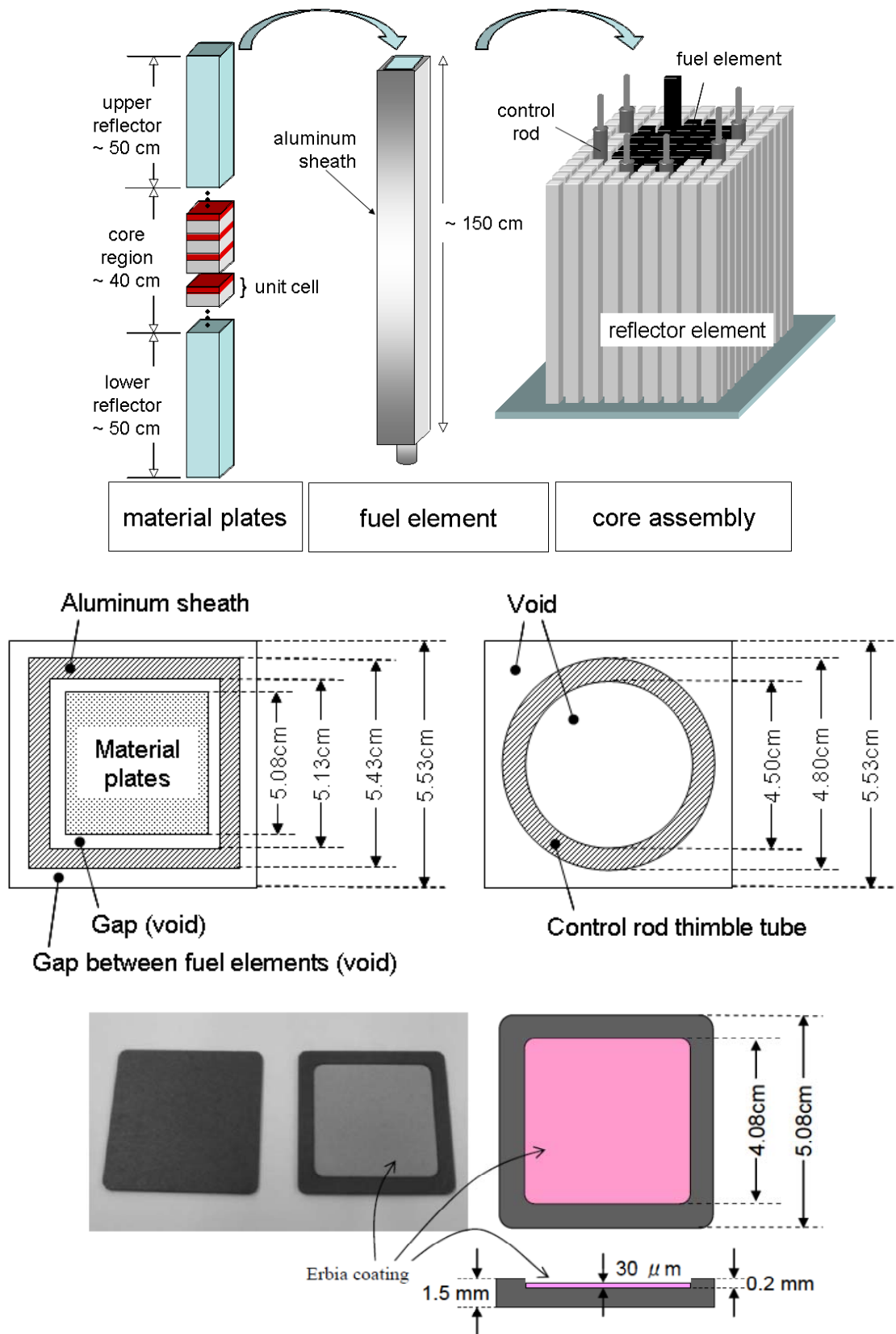


図 4.1 KUCA 臨界実験の炉心概要

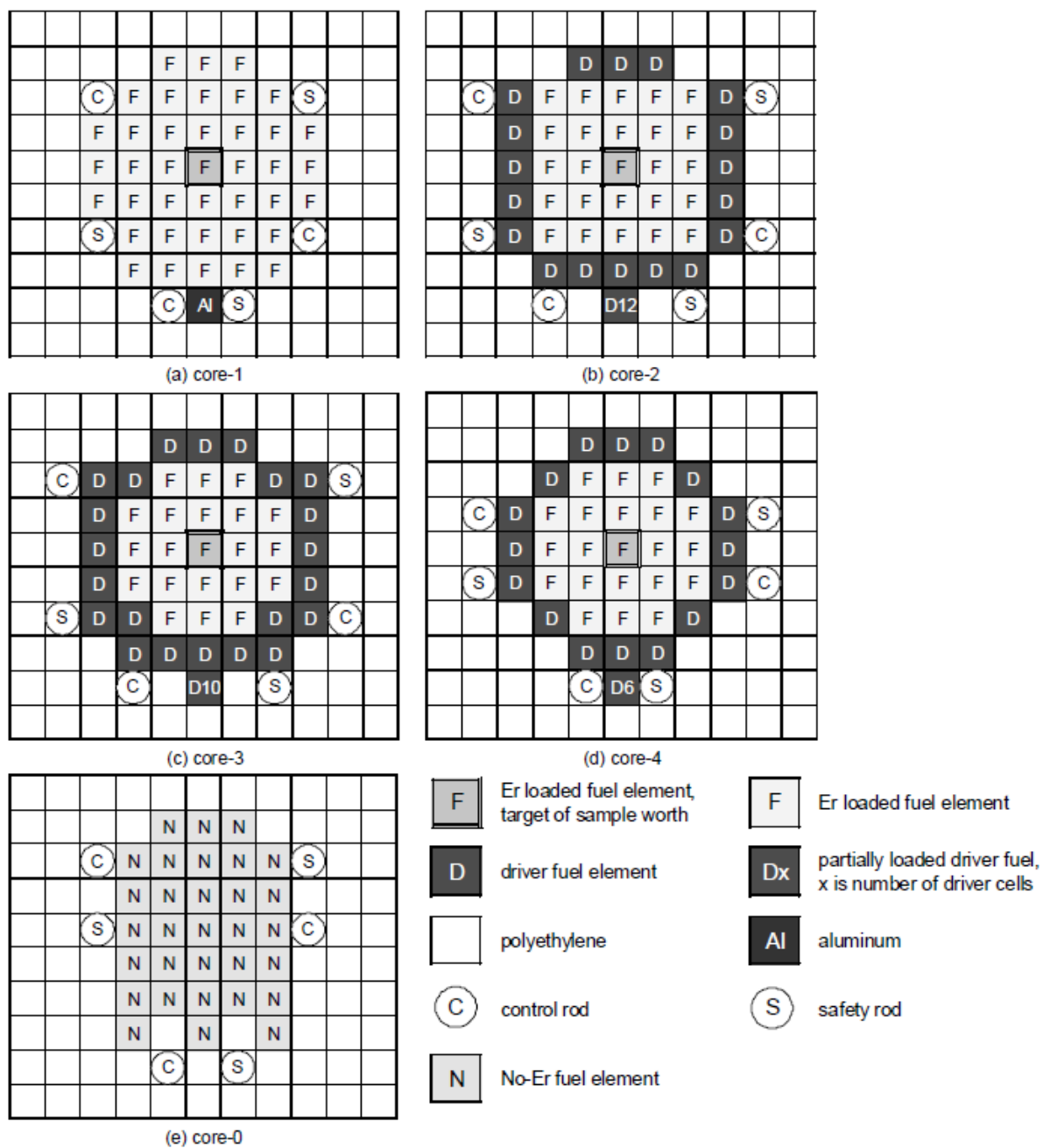


図 4.2 KUCA 臨界実験の燃料配置

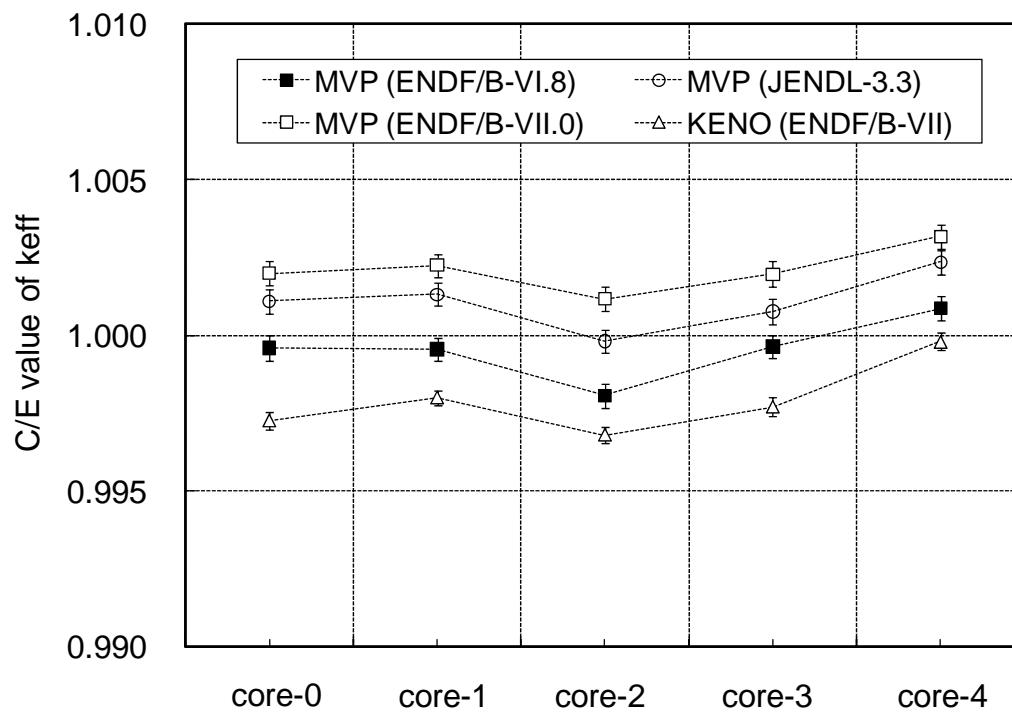


図 4.3 KUCA 臨界実験解析の比較結果 (バイアス補正後)

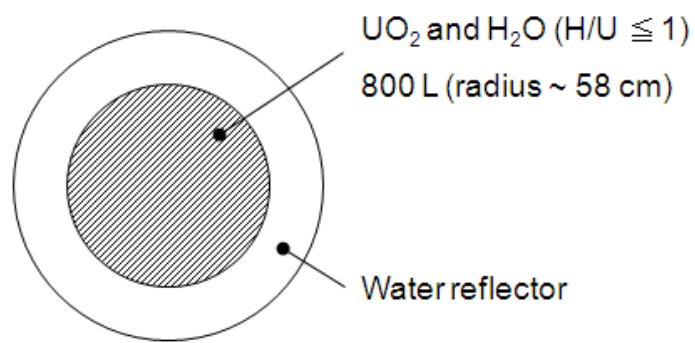


图 4.4 水密条件付 大型球体系

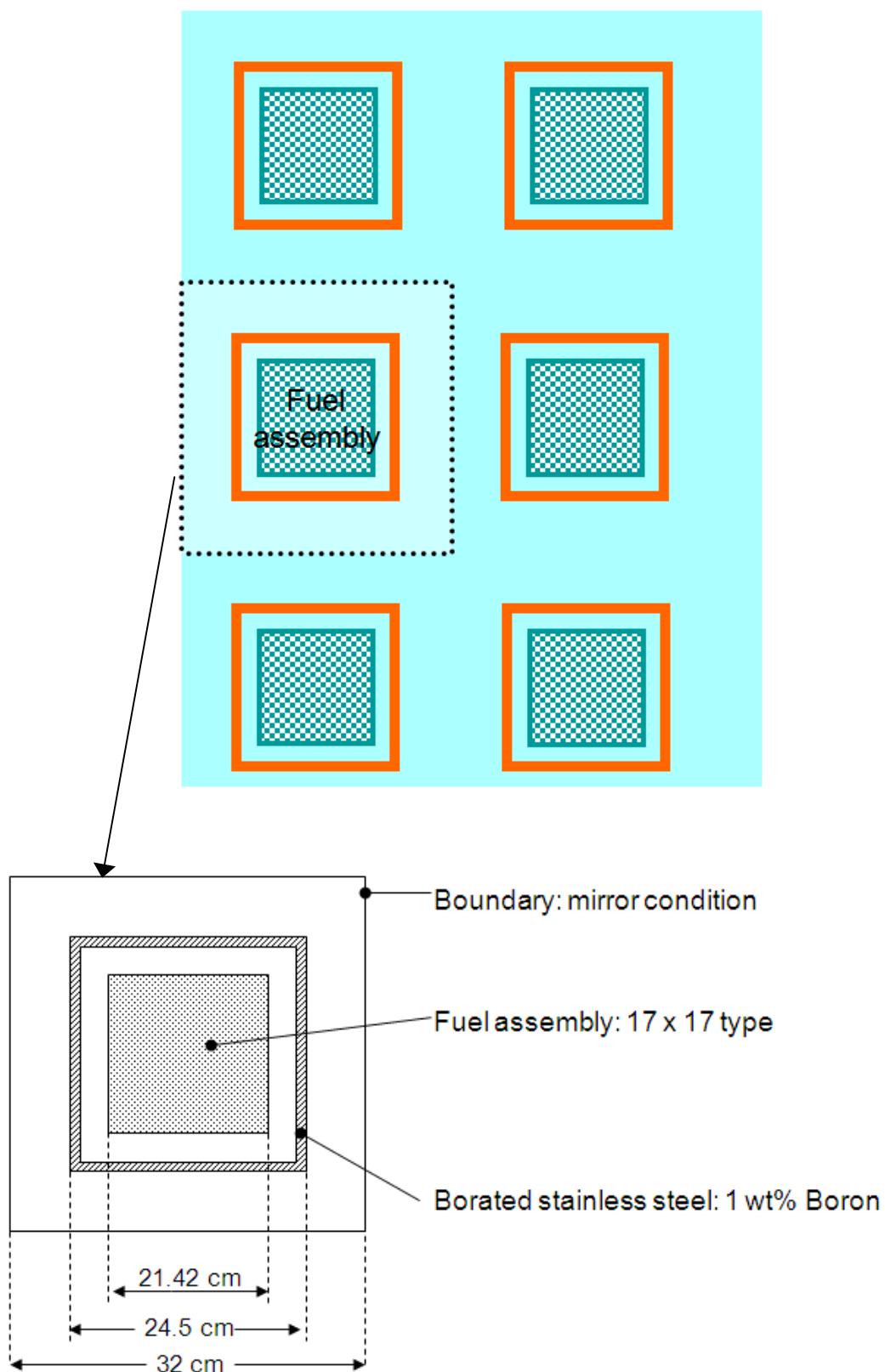


図 4.5 無限繰り返し形状 燃料集合体貯蔵ラック体系

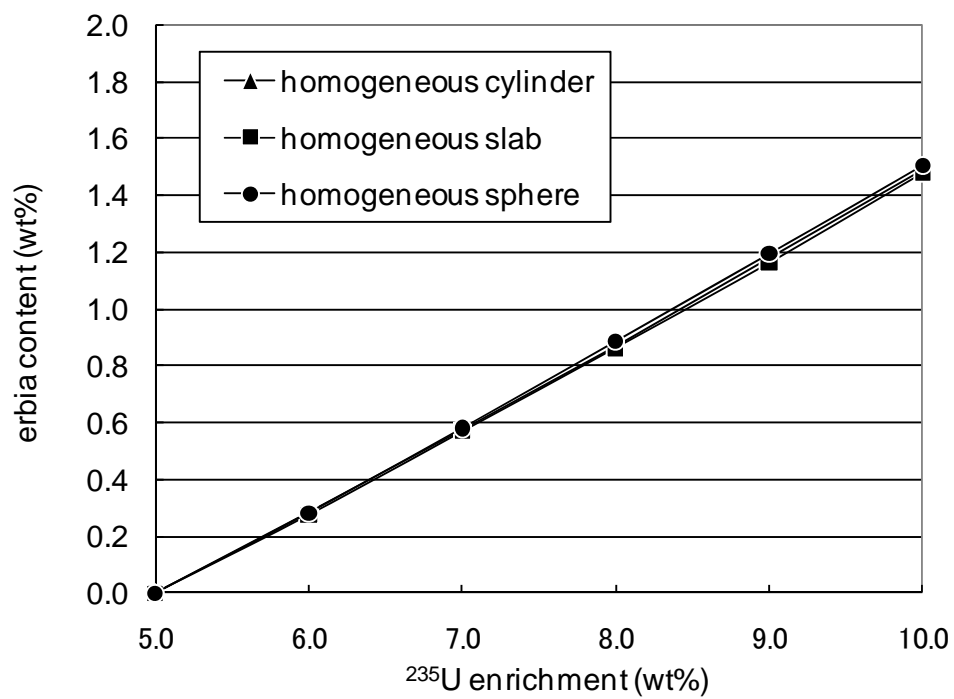


図 4.6 濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビア濃度の評価結果（均質な単純形状）

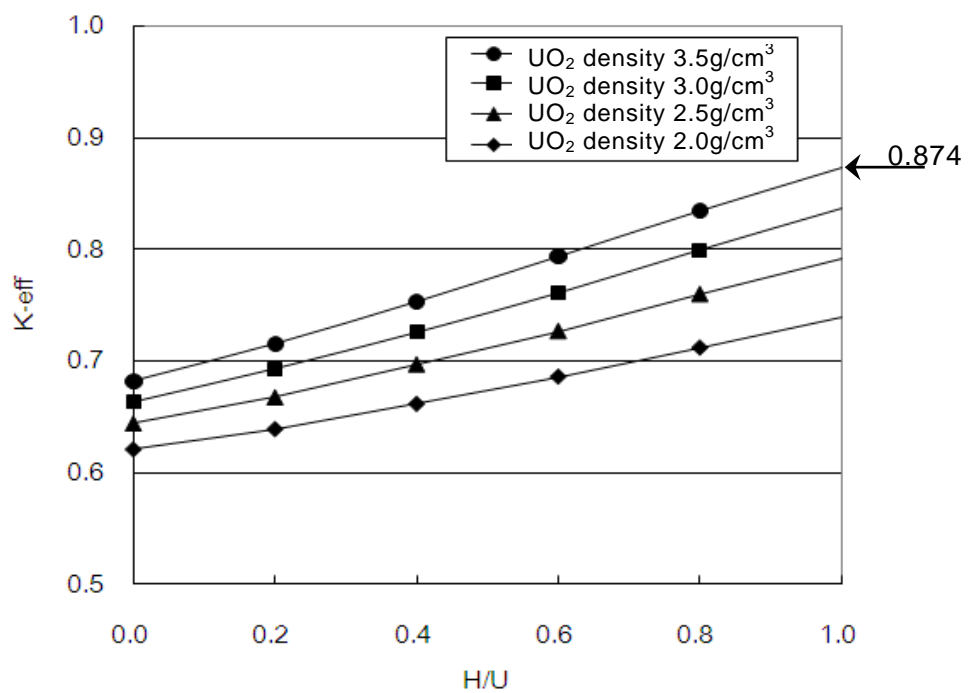


図 4.7 水密条件付 大型球体系における増倍率評価結果（濃縮度 5wt%燃料）

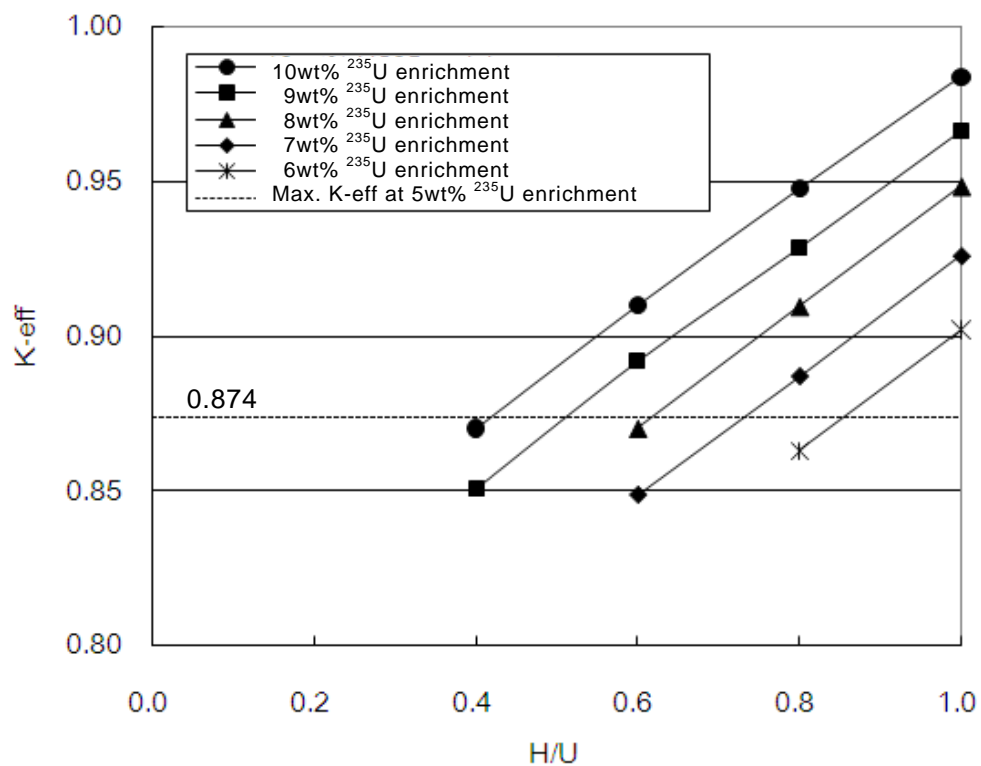


図 4.8 水密条件付 大型球体系における濃縮度 5wt%超燃料の増倍率評価結果
(UO_2 粉末密度 3.5 g/cm^3)

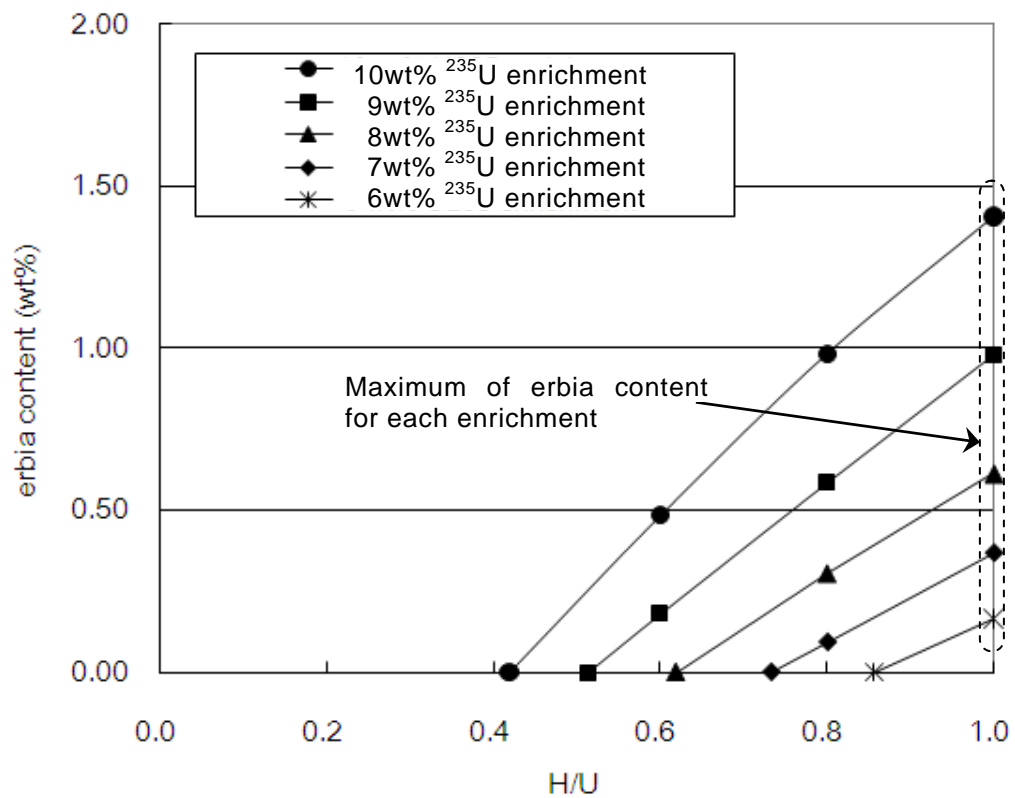


図 4.9 濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビウム濃度の評価結果
(水密条件付 大型球体系)

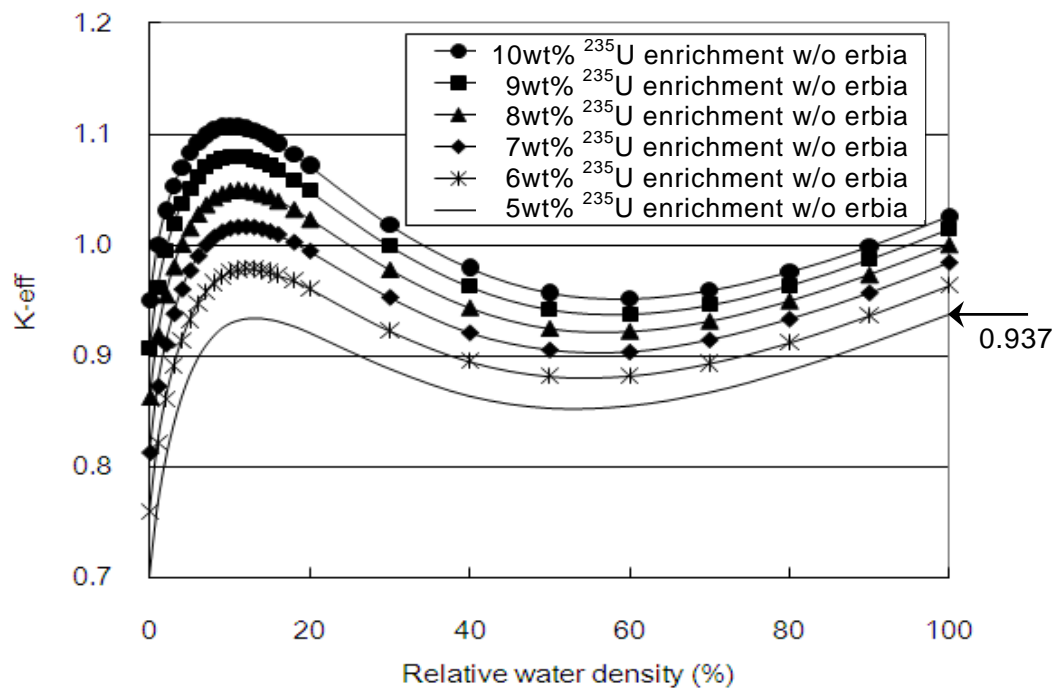


図 4.10 燃料集合体貯蔵ラック体系における濃縮度 5wt%超燃料の増倍率評価結果
(エルビウム無し)

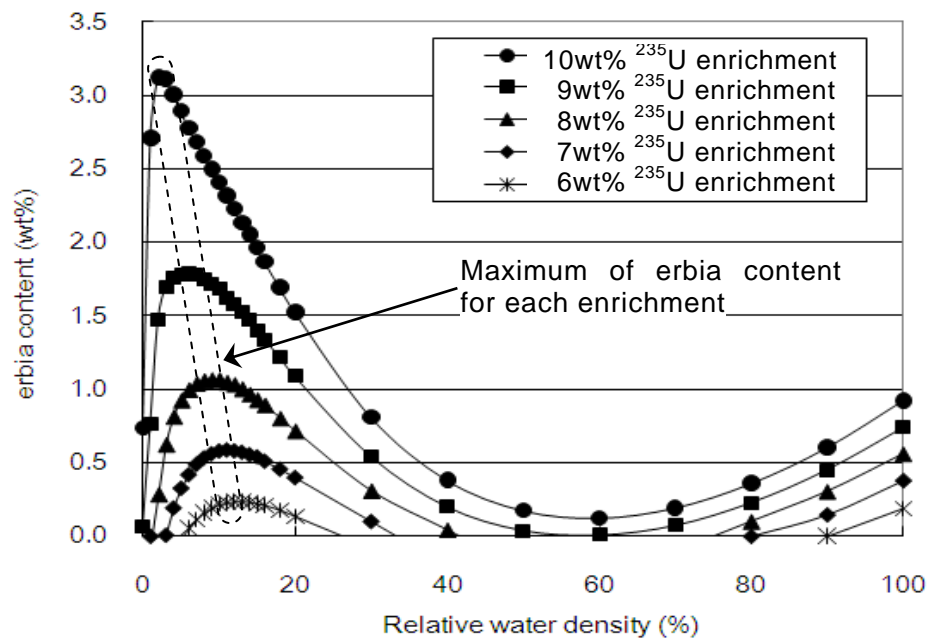


図 4.11 濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビウム濃度の評価結果図
(燃料集合体貯蔵ラック体系)

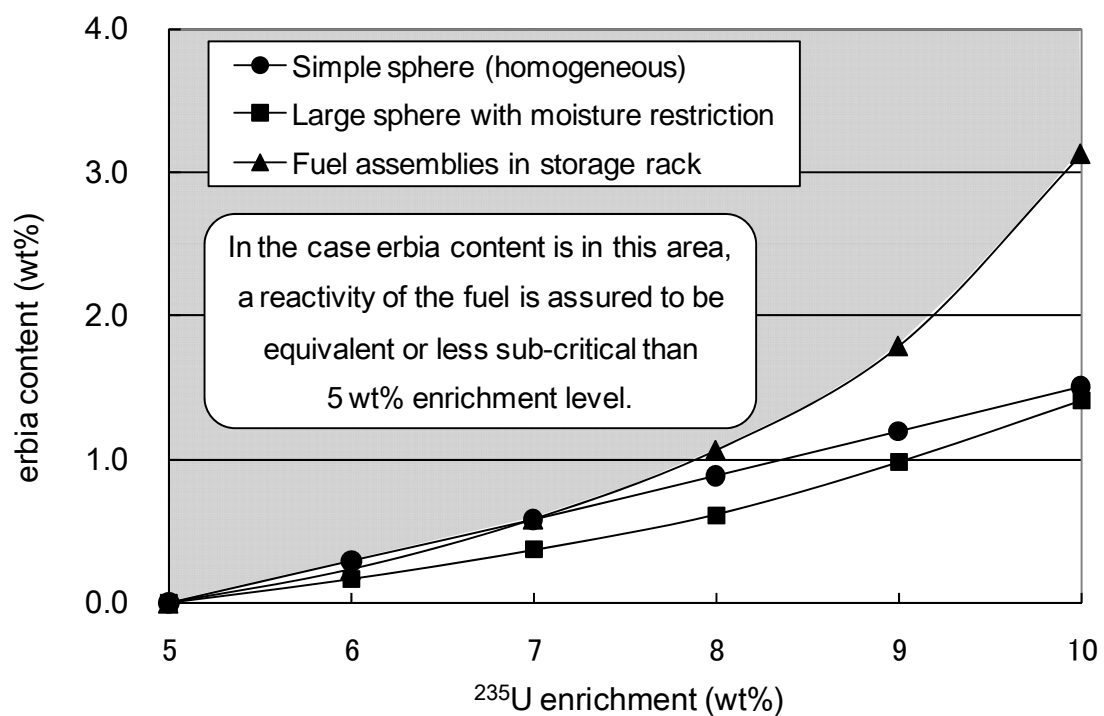


図 4.12 ECOS (Erbium Content for Sub-criticality judgment)図 :
濃縮度 5wt%と等価にするために必要なエルビア濃度の包絡線

【第 4 章の参考文献】

- 1) D. R. Damon, D. C. Morey, “Criticality Safety Limits at 5 to 20% Enrichment,” American Nuclear Society Annual Meeting, Nashville, TN, USA, June 7-11, (1998).
- 2) L. E. Paulson, W. C. Peters, “GE Validation to Support Fuel Fabrication up to 10% Enrichment,” American Nuclear Society Annual Meeting, Nashville, TN, USA, June 7-11, (1998).
- 3) "Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition", IAEA-TECDOC-1547, May, (2007).
- 4) M. Yamasaki, T. Kuroishi et al., “The Outline of Development Project on Erbium Bearing Super-High-Burnup Fuel,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, (2009).
- 5) S. Yamanaka, K. Kurosaki et al., "Thermal and mechanical properties of (U,Er)O₂," Journal of Nuclear Materials, 389, p.115-118, (2009).
- 6) 「日本原子力学会標準 臨界安全管理の基本事項：2004」, AESJ-SC-F004:2004, 社団法人 日本原子力学会（2004 年 10 月）.
- 7) 「臨界安全ハンドブック 第 2 版」, JAERI-1340, 日本原子力研究所（1999 年 3 月）.
- 8) 「臨界安全ハンドブック データ集第 2 版」, JAEA-Data/Code 2009-010, 日本原子力研究開発機構安全研究センター 原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット（2009 年 6 月）.
- 9) “SCALE: A Modular code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations,” ORNL/TM-2005/39, Version6, (2009) .
- 10) Y. Nagaya, K. Okumura, T. Mori et al., “MVP/GMVP Version 2: General Purpose Monte- Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods,” JAERI 1348, (2005).
- 11) T. Kuroishi, M. Yamasaki et al., “Calculated Results of KUCA Criticality Experiments for Er-SHB Fuel by Using SCALE Code System,” Proc. International Conference on Nuclear Criticality 2011 (ICNC2011), Edinburgh, Scotland, UK, September 19-23, (2011).

- 12) N. Sugimura, M. Imamura et al., “Burnup credit of Erbia Super- High burnup Fuel,” Proc. International Conference on Reactor Physics, Nuclear Power (PHYSOR 2008) , Interlaken, Switzerland, September 14-19, (2008).
- 13) N. Sugimura, M. Mori, M. Yamasaki et al., “The Concept of Erbia Bearing Super-High-Burnup Fuel,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, (2009).

第5章 エルビアクレジット燃料の経済性評価

5.1 緒言

エルビアクレジットの導入目的は、濃縮度 5wt%を超える全てのウラン粉末に低濃度のエルビアを混入し、濃縮度 5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保することにより、核燃料施設等の設備変更を不要とし、臨界安全上の取扱量も低減させることなく、生産性の向上を可能とすることである。本章では実際にエルビアクレジットを導入した際に期待される効果について、経済性の観点から検証する。その検証結果を踏まえ、エルビアクレジット燃料の実用化シナリオについて検討する。

濃縮度 5wt%超燃料を導入する経済性効果としては、第1章で述べたように、高燃焼度化と長サイクル運転の実施による発電コストの低減がある。一方で、濃縮度の増加を伴う高燃焼度化は、下記のような経済性を悪化させる要因も存在する。

- ・ 臨界安全性の観点からウラン燃料の取扱量が低下
- ・ 特定加工指針の適用により追加の設備投資が発生
- ・ 高燃焼度化により熱・被曝に対する対策（遮蔽や取扱量の低下）が必要

さらに、エルビアを使用することに伴う経済性悪化要因として、エルビアの残存による中性子経済が悪化する効果（エルビアペナルティ）も考慮する必要がある。

このうち、高燃焼度化による熱・被曝については、濃縮度とは直接関係は無く、濃縮度 5wt%以下でも高燃焼度化すれば同様に生じる課題である。また、エルビアの存在とも関係は無く、エルビアクレジットによって緩和もしくは悪化するものではない。一方、高燃焼度化した場合でも、発電所の使用済燃料プールでの冷却時間を十分とれば従来燃料と同等の熱・被曝量に低減できることから、濃縮度 5wt%を超えることで不連続に増加するのではない。これらの観点から、基本的には濃縮度の増加に伴い再転換費用は増加しないと仮定して評価し、感度解析にて燃焼度に依存して増加する効果を考慮することとする。

以上より、本研究では

- ・ 高燃焼度化と長サイクル運転による稼働率向上による経済性向上効果
- ・ 臨界安全性の観点から取扱量が減少する効果
- ・ 特定加工指針に対応するための資本費（設備投資）増大の効果
- ・ エルビアペナルティによって中性子経済が悪化する効果

の観点からエルビアクレジット燃料を導入した際の経済効果を検討する。

初めに 5.2 節においては、経済効果を評価するための濃縮度 5wt%超のエルビアクレジット燃料の導入シナリオと経済性評価の手法と評価に用いた各種パラメータについて述べる。経済性評価としては、核燃料の調達から再処理までを考慮した燃料サイクルコストと、燃料サイクルコストも含めて単位電力を発電するために必要となるコスト、即ち発電コストについて評価する。さらに、エルビアによる中性子経済悪化の効果を考慮するための計算モデルについても提示する。

次に 5.3 節においては、5.2 節で設定した手法に基づき、燃料サイクルコストと発電コストの評価結果をシナリオ毎に示す。

5.4 節では、評価条件の感度解析を行い、エルビアクレジットの導入効果を多面的に検討する。また、それらの評価結果を踏まえてエルビアクレジットの導入効果を最大限とするための供給シナリオについても考察する。

5.2 方法

本節ではエルビア導入シナリオを提示しこれを踏まえてこれらのオプションについて経済性評価を実施する。

本節では特に経済性評価手法について、発電コスト、燃料サイクルコスト、およびエルビアペナルティについて詳述する。

5.2.1 検討シナリオ

エルビアクレジットの経済性評価を行うために、はじめにエルビアの適用範囲を明確にし比較ケースを仮定する必要がある。経済性評価は、よく知られているように、各国の規制、地勢、市場環境などに大きく影響を受け、それに伴って最適解も異なってくる。このため、経済性評価を行う前提条件を明確にすることが大変重要となる。

5.1 節で述べたとおり、濃縮度が 5wt%超に上がる際に影響を受ける燃料サイクルステージは典型的な燃料サイクルを仮定すると下記のとおりである¹⁾。

- 1) ウラン濃縮
- 2) UF₆ の輸送
- 3) UF₆ から UO₂ への再転換
- 4) UO₂ 粉末の輸送（再転換と成型加工が同一施設内にあれば不要）
- 5) 成型加工
- 6) 燃料輸送

上記において、ウラン濃縮以前の採掘・転換工程においては、濃縮度が 5wt%を超えることにより必要となるウラン資源量は増加するものの、濃縮度自体は当然ながら 5wt%より低く天然ウランと同一である。

エルビアを混入すれば以降の施設の設備変更が不要になると仮定するので、エルビアの混入は燃料サイクルの出来るだけ上流側が望ましい。しかしながら、エルビアクレジットは粉末の形態にてエルビアを混入するという性質上、その混入はウランも粉末の形態となる再転換工程以降となる。このことから、再転換後ただちにエルビアを混入するのが適切である。

一方、これは換言すれば即ち、エルビアを混入できない再転換以前のフロントエンドの上流側（濃縮、UF₆輸送、再転換）についてはエルビアクレジットを適用できず、濃縮度 5wt%超に対応するための設備の変更が必要になる。フロントエンドの下流側（再転換工程以降の UO₂ 輸送、成型加工、燃料輸送）はエルビアクレジットにより設備の変更は不要となる。

次節ではそれぞれについてシナリオを検討する。

1) フロントエンド上流側の対応

前節で述べたとおり、エルビアクレジットはフロントエンド上流側、即ち濃縮、UF₆輸送、再転換工程には適用できない。したがって、これらの工程においてはエルビアクレジット無しで濃縮度 5wt%超に対応する必要がある。

2.2 節で述べた通り、海外では濃縮度 5wt%以下と超で規制に変化は無い。例えば、国際原子力機関（IAEA）の定義²⁾によると"高濃縮度"とは濃縮度 20wt%を超えるものであり、これに対しては濃縮度 20wt%未満の燃料と比してより厳格な管理が要求される。また、米国の規制委員会（US-NRC）は核燃料をその戦略的重要性に鑑みて3つのカテゴリーに分類している。その中で、濃縮度 10wt%未満の燃料は管理が必要な核燃料物質のうち最も戦略的重要性の低いカテゴリーIIIと定義している。米国では商業炉用の核燃料を扱う施設は10CFR70.22と10CFR70.65に示される要求事項を満たすことが求められる。審査のガイドラインとしては"Standard Review Plan (SRP)"（NUREG-1520）が示されている³⁾。基本的にこれらの規制においては、濃縮度が 5wt%を超えることにより追加の要求は特になく、5wt%以下と同様に評価を行えばよいこととなっている。

a) 濃縮工程

当初、米国においても濃縮度 5wt%を超える燃料については設計評価にに必要な核特性実測データおよび設計コードの信頼性確認データが十分でないなどの指摘もあった。しかしながら、現在既に USEC や GLE など濃縮度 5wt%超の加工が認可されている現状を鑑みれば、既存データにより対応できたと考えられる。ただ、燃焼度クレジットを含む燃焼燃料の臨界安全性評価については、燃焼における核種生成・消滅計算の妥当性を示す必要があり、データの拡充など要求事項が増加することが予想される。濃縮施設や加工施設など未燃焼燃料のみを扱う施設に対しては、濃縮度 5wt%超の認可の取得は比較的容易であり、今後は実例も増加していくであろう。

近年導入されている遠心分離法を用いた濃縮施設においては、臨界安全上の余裕は非常に大きいと言われている。これは遠心分離法の運転状況下での圧力は十分小さく、カスケード内では濃縮されたウランが臨界質量に達することがないためである。これらの濃縮施設においては容量の大きなマザーシリンダに濃縮後のウラン貯蔵することもなく、カスケードから逐一 UF₆ 用の輸送シリンダに直接装填していく。このため、輸送シリンダが濃縮度 5wt% 超の許認可を取得済であれば、濃縮施設側での設備改造は特段必要無い。このような濃縮施設では特別な設備投資無しに容易に 5wt% 超燃料の臨界安全性の担保が可能である。実際、米国の American Gas Centrifuge plant (AGS) や Louisiana Enrichment Service (LES) では濃縮度 5wt% の燃料を取扱可能となる見込みである。また仏国の Georges Besse II (GB-II) もガス遠心分離法を採用しており、濃縮度 8wt% を想定して設計されている。日本の六ヶ所村の濃縮施設も最新の遠心分離装置を導入しており、技術的には濃縮度 5wt% 超燃料に対応可能である。一方、米国の Global Laser Enrichment (GLE) も濃縮度 8wt% の燃料を扱うことを目指しているが、これは遠心分離法ではなく SILEX 法と呼ばれる分子レーザー濃縮法を採用している。SILEX 法の実現性については本稿の範囲を超えるため、不明である。

このように、近年国内外で新たに建設されている濃縮施設は遠心分離法を採用しているものが多く、既に 5wt% 超の許認可申請中または取得済の濃縮施設は複数存在している。

b) UF₆ 輸送

濃縮施設から再転換施設への濃縮 UF₆ の輸送については、適切に許認可を取得した輸送容器（たとえば 30B シリンダ）が使用される。輸送物の区分は収納物の放射能限度に依存するため濃縮度について特に制限はないが、核物質防護の観点からすれば、濃縮度は 10wt% 未満であれば 5wt% を超過しても同等の取扱が可能である。このため、輸送物の濃縮度に応じた質量制限により、臨界安全性を担保する必要がある。

濃縮度 5wt% 超燃料が市場に流通していないため、現時点で 5wt% 超の許認可を取得した商用の輸送容器は存在していない。しかしながら、例えば現在広く使用されている 30B シリンダについては、臨界安全性評価上は濃縮度 5wt% 超の UF₆ も取扱可能との概略評価結果が得られている。

c) 再転換工程

次に再転換については、ロシアの TVEL 工場を除き、濃縮度 5wt% 超の許認可を取得した商業用の再転換施設は存在しない。しかしながら、近年導入されている乾式再転換設備の場合、再転換用反応炉 (Kiln) の形状が円柱状で体積が小さく、形状制限による未臨界管理が比較的容易である。このため、このような乾式再転換設備を導入している AREVA や GNF-A の施設においては、設備変更なしで濃縮度 6wt% 程度まで対応可能であり、濃縮度 5wt% 超の燃料導入が比較的容易と考えられる。一方、旧来の湿式再転換

設備においては、比較的大容量の濃縮ウランを溶液の状態で取り扱う必要がある。一般に、溶液系では形状管理が難しく、しかも大容量を扱う場合においては濃縮度 5wt%超になった場合の未臨界管理は設備の大幅な改造を伴うことが想定される。将来的に濃縮度 7wt%や 8wt%の燃料を導入する際には、乾式再転換であっても設備の再設計は必要になると考えられる。

一方、日本国内の再転換については、現在稼働している施設は一か所しかなく、そこで国内の需要の約 1/3 を賄っている。残り約 2/3 の需要は海外にて再転換を行い UO_2 粉末の形態で輸入されている。国内唯一の再転換施設においては、湿式設備が用いられており、上述の通り湿式設備の特質として、濃縮度 5wt%超に対応するためには設備の大幅改造や運用の大幅な見直しが必要となる。それに加え、特定加工指針⁴⁾が適用され臨界事故の想定、公衆被曝の防止などが要求されると、立地や遮蔽の観点からの対応も必要になる可能性ある。このため、新規に再転換施設を建設するのと同程度の大きな投資が必要となると推定される。

以上をまとめると、濃縮施設に関しては既に濃縮度 5wt%超に対応している施設もあり、国内外を問わず比較的小さな投資で対応可能である。最近の乾式再転換設備を導入している施設においても、比較的に濃縮度 5wt%超に対応可能と考えられるが、湿式再転換設備を用いている施設では、設備改造などの大きな投資が必要となる。日本においては、特に大きな設備投資が必要になると推定される。

2) エルビアクレジットの適用オプション

前節までの議論を考慮し、日本国内で濃縮度 5wt%燃料を導入するための考え得る妥当なオプションとして、本研究では以下の 3 つを仮定する。

- ・ オプション 0 : エルビアクレジット無しで濃縮度 5wt%超に対応する。
- ・ オプション 1 : 海外の 5wt%超に対応可能な再転換施設にてエルビアを混入し、国内ではエルビアクレジットを活用して濃縮度 5wt%超に対応する。
- ・ オプション 2 : 国内で新規に濃縮度 5wt%超に対応可能な再転換施設およびエルビア混入施設を新規に建設し、以降はエルビアクレジットを活用して対応する。

以下にそれぞれについて詳述する。

a) オプション 0

オプション 0 はエルビアクレジットを一切活用しないオプションである。濃縮、再転換施設のみならず、成型加工や新燃料輸送容器や貯蔵施設など、全ての燃料サイクルインフラは再設計されるか、臨界安全の観点から取扱量を減少させる必要がある。この場合、設備の変更に伴う大きな投資が必要となることに加え、取扱量が減少することによる生産性の低下もあり、燃料サイクルコストひいては発電コストを大幅に悪化させるこ

とが懸念される。

濃縮施設については既に濃縮度 5wt%超に対応している施設が存在することを鑑み、本研究では再転換と加工施設において設備投資が発生することとする。さらに、臨界安全の観点から取扱量が減少する効果を考慮し、経済性評価を実施する。

b) オプション 1

オプション 1 では、海外の濃縮施設にて濃縮度 5wt%超燃料を濃縮し、同じく海外の再転換施設にて再転換およびエルビアの混入を実施するものである。現時点においても日本は濃縮の 100%と再転換の約 2/3 を海外に依存している状況を鑑みれば、現実的な選択肢といえる。エルビアは濃縮度 5wt%超燃料への対応が容易な乾式再転換を導入している施設にて混入することを想定する。この場合、濃縮度 5wt%超に対応するための許認可費用は発生するものの、設備投資にまつわる大きな投資は発生しないと見込める。ただし、既存の設備をそのまま使用することを前提としているため、対応可能な濃縮度はせいぜい 6wt%程度であることに留意が必要である。

このオプションでは、現実的なシナリオかつ非常に少ない初期投資で濃縮度 5wt%超エルビアクレジット燃料の導入が可能と期待される。

c) オプション 2

オプション 2 では日本国内で濃縮度 5wt%超の濃縮および再転換を実現するものである。濃縮については既存の青森県六ヶ所村の濃縮施設にて技術的には濃縮度 5wt%超に対応可能と推測されるが、再転換については立地や遮蔽の観点から新規建設並みの設備投資が必要になる。ここでは、乾式再転換を用いた再転換施設を新規に建設すると仮定する。このオプションを実現するためにはより長いリードタイムと大きな投資が必要となる。海外の既存の再転換設備を利用するオプション 1 では濃縮度 6wt%程度までしか対応できないため、さらなる高燃焼度化のためにより高濃縮度の燃料を導入する際には、このような施設が必須となる。

そのような経済性の観点以外にも、濃縮度 5wt%超に対応可能なインフラを自国内にて完備しておくことは、エネルギーの安定供給や海外との価格交渉力の観点からも意義がある。

なお、再転換施設を新規に建設する場合は、濃縮施設と同一敷地内で再転換およびエルビア混入まで実施する施設を設置することが合理的である。これにより、高濃縮 UF₆ の輸送は管理区域内の構内輸送のみとなり、一般公道での輸送が排除できるため、輸送に関する許認可の負担が大幅に軽減できる。日本では上述の青森県六ヶ所村にて濃縮、再転換およびエルビア混入を実施するのが妥当である。

5.2.2 発電コスト

1) 評価の考え方

本研究においては、経済性評価は発電コストの比較によって行う。発電コストの算出においては 2004 年に電気事業連合会（以下電事連）が実施した発電コストの試算方法⁵⁾、および 2011 年 12 月の福島事故を踏まえたコスト見直し小委員会の試算方法⁶⁾に準拠する。いずれの手法とも、原子力発電の経済性評価において一般的に採用されている OECD/NEA の手法（運転年数発電原価方式）である⁷⁾。また、運転サイクル長の長期化の経済性評価にあたっては、辻蔵らの検討⁸⁾も参考にした。

本研究では濃縮度や取出燃焼度が変化する効果や、エルビアペナルティによる中性子経済が悪化する効果は別途詳細に考慮するが、それ以外の全てのコストパラメータおよびその値は基本的には上記の報告書に記載された値をそのまま流用することとする。これは、本研究の主たる目的がエルビアクレジットを用いた高濃縮度燃料の導入による影響を評価することであり、石油火力や石炭火力など他の電源との発電コストの絶対値を比較することが目的ではないことを鑑みれば、妥当な仮定と言える。コスト見直し小委員会の評価にて示された「政策コスト」に関しても、同様に本研究での検討の範囲外であるため、考慮しないこととする。

2) 評価式とパラメータ

発電コストは以下の式により求める。なお、便宜上通貨はドル[\$]にて評価し、1\$=100 円にて換算している。

$$\text{発電原価} [\$/MWh] = \frac{\text{資本費} + \text{運転費} + \text{燃料費} [\$]}{\text{発電電力量} [MWh]}$$

また、計算対象炉のプラント諸元は次のとおりである。

- ・ 構成：国内標準 4 ループ PWR（3 バッチ）
- ・ 濃縮度：4－9 wt%
- ・ 取出燃焼度：40－110 GWd/t
- ・ 運転期間：40 年
- ・ 定検期間：80 日（1997－2003 年の国内 PWR 平均稼働率 85%を達成しうる日数）

評価に使用したコストパラメータの一覧を表 4.1 に示す。これらの値は前節で述べたとおり電事連の評価にて使用されたものと同一である。原子力発電では、費用の発生時期が大きく異なるため、将来（または過去）に発生する費用は現在価値換算を行うのが一般的である。現在価値換算に用いる割引率は、本研究の対象が国内の次世代軽水炉燃料であることから、電事連のコスト試算の基準である 3%を用いる。これは、日本国内

の状況を鑑みて設定された値であるが、海外で一般的に使用されている値（5～10%）に比べると小さい^a。

電事連の評価では燃料の取出燃焼度は 45 GWd/t に固定されていたが、本研究では高濃縮度化による取出燃焼度が増加する効果を調べることを目的としているため、簡易ツール^bにて濃縮度に対する取出燃焼度を求め、評価に用いた。その際、バッチ数は 3 に固定し、サイクル長、取出燃焼度をサーベイした。定検期間は 80 日としているので、サイクル長に応じて原子炉の稼働率が変化することとなる。これらの効果を全て考慮して経済性評価を実施する。

また、今回評価した取出燃焼度の一部は 100 GWd/t を超過し、現時点では被覆管など健全性が必ずしも保証されていない燃焼度領域である。本研究の主な目的は燃料サイクルフロントエンドにおけるエルビアクレジット燃料の経済効果を確認することであるので、このような材料の観点からの考察は今後の課題とする。

3) 代替発電費

定検期間中は原子炉が停止しているため、その期間の発電量を火力発電で賄う必要がある。通常、発電電源間の発電コストを比較する際には代替発電費は考慮しないが、本検討では原子力発電においてエルビアクレジットを導入する場合としない場合の運転方法の比較を目的としているので、代替発電費も考慮することとする。具体的には、原子炉が停止している期間に減少する原子力発電量を石油火力発電で補うことを想定し、発電コストに代替発電費を加えるものである。

原子炉停止期間中の代替発電費は、以下の式で求める。

$$\begin{aligned} & \text{代替発電費} [\$/kWh] \\ & = (100\% - \text{原子力稼働率} [\%]) \times \text{火力燃料費} [\$/kWh] \end{aligned}$$

濃縮度を高めて長期サイクル運転を実施することで稼働率が向上すると、代替発電費は大きく抑えられる。火力燃料費としては 4.0 [\$/MWh] を使用した。

ここで、本研究の主旨は経済性の観点からエルビアクレジットの導入効果を検討することであり、原子力発電の経済性そのものを議論するものではない。この観点から、本研究では燃料サイクルコストのみ以下に述べ、他のパラメータやその値は基本的には 2004 年の電事連試算で使用されたものをそのまま流用するものとする。ただし、コスト見直し小委員会を導入された政策的コストは、本研究の主旨にそぐわないため、考慮しない。

^a割引率が大きい場合、遠い将来に発生する費用ほど現在価値が小さくなる。このため、例えば数十年先に発生する再処理コストは割引率が大きい場合ほどコストを削減するインセンティブが働きにくくなる。割引率が小さい日本においては、逆に再処理コストを削減するインセンティブが強くなる。

^b この簡易ツールは燃料バッチ毎の反応度変化を線形モデルで近似し、炉心平均の反応度、取替バッチ数、サイクル長、取出燃焼度等を簡便に評価するものである。同様のツールが原子燃料の仕様決定や燃料運用の検討に一般的に用いられている。簡易ツールについては 5.2.4 節で詳細に述べる。

5.2.3 燃料サイクルコスト

1) 評価手法

燃料サイクルコストは燃料単位ウラン重量当たりの総コストを発生したエネルギー量で除したものとして定義される。

$$\text{燃料サイクルコスト } [\$ / MWh] = \frac{\text{燃料費 } [\$ / kgU]}{\text{発電電力量 } [MWh / kgU]}$$

燃料サイクルコストに用いるコストパラメータについては、電事連の計算を再現できる計算ソフトおよび計算結果として原子力委員会が公開した値⁹⁾を採用した。ウランとプルトニウムのクレジットは、電事連の試算と同様に含めないこととした。

2) ウラン鉱石調達・濃縮

ウラン鉱石の調達・精錬費 $[\$ / kgU]$ については、必要な天然ウラン量 $[kgU_{nat}]$ に調達・精製のコスト単価 $[\$ / kgU_{nat}]$ を乗じて計算した。ここで言う必要な天然ウラン量とは、完成した燃料集合体の単位ウラン重量 $[kgU]$ あたりの製造に必要な量である。したがって、必要となる天然ウラン量は燃料集合体の濃縮度が増加するに従って増加することとなる。ウラン鉱石の調達・精錬費は $55 \$ / kgU_{nat}$ を使用し、ウランの濃縮度の変化に伴い変化せず一定と仮定した。

濃縮費 $[\$ / kgU]$ は、濃縮にかかる分離作業量 (SWU) に濃縮単価 $[\$ / kgSWU]$ を乗じて計算した。供給ウランの濃縮度は 0.711% 、テイルウラン濃度は 0.3% と仮定した。濃縮度と分離作業量 (SWU) は対数比例関係であり、製品量を $1 kgU$ と仮定した場合の SWU は、濃縮度 4.5% では $5.41 tSWU$ 、 9% では $15.6 tSWU$ と 2 倍以上になる。濃縮単価については、今後実際の市場においては濃縮技術の進歩や市場競争により濃縮単価はむしろ減少する可能性があるとの見方があるが、本研究では濃縮度の増加に伴って変化しないものと仮定した。濃縮度の増加に伴い、必要となる天然ウラン量、分離作業量は増加するが、それらの単価は現在の市場単価と同一の $170 \$ / kgSWU$ で一定とした。また、オプション 0, 1, 2 で濃縮単価は同一とした。

3) 再転換・成型加工

再転換および成型加工費 $[\$ / kgU]$ は、製品燃料集合体の単位ウランあたりの資本費、操業費、部材費の和として表わされる。ここで、下記の仮定を置いている。

- a) 資本費は固定費であり、再転換・成型加工施設の修正改造、維持、許認可等に要する費用である。
- b) 操業費も固定費であり、主に人件費である。固定費である資本費と操業費は加工量に依存しない。
- c) 部材費は変動費であり、加工する燃料集合体数に比例する。

d) 資本費，操業費，部材費の比率は 1：6：3 とする

e) それぞれのオプション 0，1，2 において，資本費，操業費，部材費の比率やその総額である加工費は以下に述べる仮定に応じて変動する。

再転換および成形加工施設において着目すべきコスト要因は，①臨界安全の観点から取扱量が減少し生産性が低下する，②同じく臨界安全の観点から必要となる設備投資，の 2 つである。

濃縮度 5wt%超燃料の導入により，現行の成型加工施設の臨界安全上の核的制限値が変更されると，施設の燃料取扱量が減少する。この場合，生産される燃料の単位重量あたりの固定費，即ち資本費と操業費が増加する。濃縮度 5wt%のウラン燃料の球体系での臨界質量は約 37 kgUO₂であるが，濃縮度 10 wt%では約 13 kgUO₂と約 1/3 になる¹⁰⁾。生産量は必ずしも臨界質量のみで制限されるわけではないが，日本のように限られた敷地内で空間効率を最大限活かして最適化しているような施設では，生産量が臨界質量に依存するという仮定は妥当である。この仮定の元では取扱量が 1/3 になれば加工量も 1/3 になるので，濃縮度が 5wt%から 10wt%に増加することで，固定費である（資本費＋操業費）は約 3 倍になる。濃縮度と臨界質量の相関が線形であると仮定すると，増加係数 α は濃縮度 ε の関数として $\alpha = \frac{2}{5}\varepsilon - 1$ と表すことができる。これがエルビアクレジットを使用しない場合の取扱量の増加に伴う加工コストの増加となる。厳密に言えば，濃縮度と臨界質量は必ずしも線形の相関ではないが，図 5.1 に示すように濃縮度 5～10wt%の範囲においては妥当な近似である。オプション 1 と 2 においては，エルビアクレジットの効果により取扱量を低下させる必要が無くなるので， α は 1.0 で一定である。

一方，部材費は加工量に比例するため，加工量が減れば同様に製造高江値単価は減る。

考慮すべきもう一つの要因は，濃縮度が増加することに伴い臨界安全性を担保するための設備変更が生じ，そのための設備投資が必要となることである。1.2.2 節に示したように，濃縮度 5wt%を超えることにより特定加工指針の適用を受けると，万一の臨界事故を想定し，これに対する適切な対策として，(1)臨界警報装置の設置その他の臨界事故の発生を想定した適切な措置（臨界及びその継続性の検知）が講じられる設計であること，(2)臨界事故が発生したとしてもこれを未臨界にするための措置が講じられる設計であること，が要求される。これに伴うコスト評価は非常に困難であるが，新規に加工施設を建設するのと同程度の設備投資が必要と考えられる。既存の加工施設は既に減価償却が終了しているため資本費はほとんど発生しないが，5wt%超燃料を導入する際には新たに資本費を考慮する必要がある。

上記を勘案し，オプション 0（エルビアクレジットを適用しない場合）では，再転換施設も成型加工施設もともに新設が必要と仮定しているので，資本費は 2 倍になると設定した。

これに対し、オプション 1 では海外の既に濃縮度 5wt%超対応済の再転換施設を使うので、資本費の増加は無いと仮定する。エルビアクレジットを導入すれば、加工施設の設備変更も不要であり、資本費の増加は無い。再許可に関わる費用は必要となるが、これは後述する通り無視できるほど微少である。

オプション 2 では日本国内での再転換施設のみ新規で建設すると仮定するので、これに伴う投資が必要となる。オプション 0 では再転換施設と加工施設の双方の新設が必要なので、資本費は 2 倍になると仮定したが、オプション 2 では再転換施設のみ新設するため、資本費は現行の 1.5 倍になると仮定した。エルビアクレジット導入により、加工施設の設備投資は不要である。

エルビアクレジットを導入する際は上記の他に許認可に伴うコスト増加は考慮する必要がある。しかしながら、許認可コストは設備投資に比べれば無視できるほど微少である。また、エルビアクレジットに伴うエルビア購入費用も無視できるほど微少である。例えば、エルビア購入単価を 160 \$/kg^c とすると発電コストを高々 0.01 \$/MWh 増加させる程度である。また、UF₆、UO₂ 粉末、および製品集合体の輸送は通常、再転換・成型加工メーカーが担っており、輸送費は再転換・成型加工費に含まれているものとする。

以上の議論を踏まえ、個々のオプションの概要を表 5.2 にまとめる。表 5.2 ではオプション 1, 2 に加え、エルビアクレジットを用いないオプション 0 と、濃縮度 5wt%を超えても一切コストの悪化が無いと仮定した理想ケースである **Reference** についても併せて示している。さらに、各オプションにおける濃縮度毎の具体的なコストの値を表 5.3 に示す。なお、エルビアを使用することによる中性子経済の悪化については、別途 5.2.4 節にて示す。

4) 再処理

燃料サイクルにおけるバックエンドのシナリオには様々なオプションが考えられる。例えば再処理を行わないワンススルー、再処理を行う場合も中間貯蔵の是非、再処理の時期、最終処分の方法により、コスト評価結果は大きく異なる。一般的な傾向として、現行の軽水炉燃料再処理施設では燃料の高燃焼度化により γ 線・中性子線量、発熱量が増加すると、放射線遮蔽、除熱の設計対応が必要となる。崩壊熱や放射線量は燃料の燃焼度に比例して増加するが、必ずしも燃料の濃縮度には比例しない。もちろん、濃縮度が高いほど燃焼度も高くすることが容易ではあるが、燃焼度は取替体数やサイクル燃焼度で決定され、濃縮度のみで決定されるものではないことを注記しておく。従って、高燃焼度化に伴う再処理費用の増加は濃縮度に依存するものではなく、濃縮度が 5wt%を超えるか否かには直接関係が無く、濃縮度 5wt%以下でも高燃焼度化を進めれば同様に遮蔽・除熱の対応は必要となる。また、再処理コストはエルビアの存在と関係は無く、エルビアクレジットによって緩和できるものでもないしエルビアによって被曝量が増

^c USGS（米国地質調査所）の 2006 年版『鉱物資源希土類年鑑』より

加するものでもない。(緩和もしくは悪化するものではない)

以上の観点から、本研究ではエルビアクレジット燃料の導入に伴う再処理コストの増加は考慮しないこととする。ただし、この仮定の妥当性を確認するため、日本の典型的なバックエンドのシナリオについて再処理コストが増加する影響を、感度解析として別途 5.4.4 節で議論する。

5.2.4 エルビアペナルティの考慮

1) 一点炉モデル

電事連の評価、コスト小委員会の評価とも、代表的な燃料運用の例として濃縮度は 4.1%，取出燃焼度は 45 GWd/t に固定されていた。本研究においては、高濃縮度燃料の導入による経済効果を把握することを主目的とするため、濃縮度に応じて取出燃焼度およびサイクル長の変化も適切に考慮する必要がある。サイクル長が変化するとプラントの稼働率が変化するが、例えば長期サイクル運転を採用すると一般にプラントの稼働率は上昇し、経済性は向上すると言われている。本研究では一点炉近似モデルを用い、各濃縮度に対する取出燃焼度やサイクル長を評価することとする。以下に一点炉近似評価モデルについて示す。

一点炉近似モデル（One Point Reactor Model : OPRM）は濃縮度，サイクル長，取出燃焼度の相関を簡便に評価することが可能な計算モデルであり，燃料設計や炉新設計の現場で炉心の長期運用法方の概略検討などに広く使用されている。一点炉近似モデルについては文献 11 を参照し，独自にツールを開発した。

一点炉モデルにおいては，燃料バッチ毎の反応度変化を濃縮度と燃焼度の関数式で近似し，炉心平均の反応度，取替バッチ数，サイクル長，取出燃焼度等を簡便に評価するものである。一点炉モデルではサイクル末期の炉心平均反応度を下記のように近似する。

$$R_{\text{core}} = \sum_i f_i R_i(\text{bup}, \text{enr}) - R_{\text{leakage}}$$

ここで

R_{core} : 炉心平均反応度，
 R_i : バッチ i の燃料反応度，
 f_i : バッチ i の炉内バッチフラクション，
 R_{leakage} : 炉心平均中性子漏えい量

である。

本研究では 3 バッチの運用方式を仮定しているため，上式における $f_i = 1/3$ となる。また各バッチの出力分担は一定と仮定している。 $R_{\text{core}} \geq 1.0$ の期間が運転可能なサイ

クル長となる。上式に用いる燃料濃縮度毎の燃焼度 vs 反応度の相関は CSMO-4 コード^{12,13)}を用い、国内 4 ループ PWR 用集合体、濃縮度 4–9wt%を仮定して計算した。炉心平均中性子漏洩反応度については、当該ツールの評価結果がいくつかの平衡炉心サイクルを再現するよう経験的に 6.24%に設定した。さらに、当該ツールにエルビアペナルティを考慮する機能を追加したが、これについては次節にて詳述する。

2) エルビアペナルティモデル

エルビアはいわゆる『可燃性毒物』と称されている通り、寿命初期には毒物すなわち中性子吸収材として反応度を抑制する働きがあるが、燃料が燃焼するにつれて次第にその効果は薄れ、寿命末期には反応度抑制効果は消滅するよう企図されている。しかしながらよく知られているように、実際には下記に示す 2 つの効果により、寿命末期においてもエルビアを混入したことによる反応度抑制効果が残存している。これは運転サイクル末期の原子炉の反応度を低下させることとなり、原子炉の経済性を阻害するため、反応度ペナルティとなる。

エルビアには、主に ^{166}Er 、 ^{167}Er 、 ^{168}Er 、 ^{170}Er の 4 種類の同位体が存在し、このうち ^{167}Er が毒物としての寄与が大きい。 ^{167}Er は前述のとおり燃料の燃焼とともに減損していくが、一方で ^{166}Er が中性子を吸収して ^{167}Er に転換していくため、 ^{167}Er が新たに生成し、ある個数密度で平衡状態となり、消滅しない。また、エルビアを燃料中に混在させることにより、その分ウラン（および ^{235}U ）の重金属量が減少する。このため、たとえエルビアが完全に消滅したとしても、元々エルビアが存在していないウラン燃料と比べ、初期のウラン量が減少することによる反応度減は常に伴う。これら 2 つの効果を合算したものが『エルビアペナルティ』の正体である¹⁴⁾。

エルビアペナルティは燃料に添加するエルビア濃度が増加するほど増加する。図 5.2 に第 4 章で示したウラン濃度に対する必要なエルビア濃度を示すが、エルビアクレジットにおいては、ウラン濃縮度が高くなるほど濃縮度 5wt%燃料と同等の未臨界度を担保するためのエルビア濃度を高くする必要がある。したがって、エルビアクレジットの経済性を評価するに当たっては、添加するエルビア濃度に応じたエルビアペナルティの効果も適切に考慮に入れる必要がある。

エルビアペナルティの効果を定量的に評価するた、濃縮度 6wt%のウラン燃料に 0.2 から 2.0wt%のエルビアを混入させた計算を実施した。計算は CASMO-4 コードを用い、標準ライブラリである L-library を使用した。図 5.3 にエルビア濃度毎のエルビアペナルティを示す。図 5.3 においては、集合体中の全ての燃料に均一にエルビアを混入させているが、これはエルビアクレジット燃料においては、全ての燃料中に均一にエルビアを混入させることが基本的な設計であるためである。図 5.3.(a)は集合体計算による無限造倍率の燃焼度依存性を示しており、(b)はエルビアペナルティを示している。エルビアペナルティはエルビアを含まない燃料と含む燃料の反応度差として定義している。

エルビアペナルティを一点炉ツールで考慮するため、図 5.3.(b)で得られた値を用いてエルビアペナルティを燃焼度依存の関数式 $R_{\text{erbia}}(\text{bup}, \text{Er})$ 、 Er は初期のエルビア濃度、で表した。このとき、エルビアペナルティを考慮したバッチ i の燃料反応度 R'_i は下記のよう示される。

$$R'_i(\text{bup}, \text{enr}, \text{Er}) = R_i(\text{bup}, \text{enr}) - R_{\text{erbia}}(\text{bup}, \text{Er})$$

ここで、厳密にはエルビアペナルティはウラン燃料の濃縮度依存性がある。即ち、濃縮度が高くなるほどスペクトルが硬化し、エルビアの吸収率が小さくなり、エルビアペナルティも減少する傾向がある。しかしながら、濃縮度 5–9wt% の範囲ではその効果は小さく、無視できる。即ち、本研究ではエルビアペナルティのウラン濃縮度依存性は考慮しないこととし、エルビアペナルティは初期に混入させるエルビア濃度のみに依存するものとした。従って

$$R_{\text{core}} = \sum_i f_i R'_i(\text{bup}, \text{enr}, \text{Er}) - R_{\text{leakage}}$$

によって燃料濃縮度と炉心の運転サイクル長および取出燃焼度等を評価した。

このツールを用いて、エルビアペナルティを考慮した場合の燃料濃縮度・運転サイクル長に対する取出燃焼度の相関を評価し、この評価結果を用いて、エルビアクレジット燃料を用いた際の燃料費の算出を行った。

5.3 結果

5.3.1 エルビアペナルティの効果

今回開発した一点炉ツールを用いて、ウラン濃縮度毎のエルビアクレジット燃料に対して、エルビアペナルティを考慮した場合の運転サイクル長に対する取出燃焼度の相関を評価した。一例として、エルビアを混入させた場合と混入させない場合の取出燃焼度評価結果を図 5.4 に示す。この計算ではエルビア濃度は図 5.2 のようにウラン濃縮度に応じて増加させている。

このように、エルビアペナルティを考慮すると、特に濃縮度が 8wt% を超えるとペナルティの効果が大きくなっている。これは、図 5.2 に示したように、濃縮度が高くなるほど必要なエルビア濃度が大きくなるためである。このため、エルビアクレジットはエルビア濃度が高くなる場合においては特に、必ずしも経済合理性を見いだせない可能性を示唆している。

エルビアペナルティの低減のため、例えばエルビア濃度分布の最適化、ガドリニアなど他の毒物との併用、同位体濃縮エルビアの利用、などが考えられる。このようなエル

ビアペナルティを低減させるための検討は濃縮度 8wt%を超えるような高濃縮度燃料を導入する際はより重要となるであろうが、これは今後の課題とする。

5.3.2 燃料サイクルコスト

5.2 節で仮定した条件を Base ケースとし、Base ケースでの各オプションの燃料サイクルコストを評価した。表 5.4 には Base ケースに加え、後続の 5.4.3 節で述べる感度解析のケースについても併せて示している。コストパラメータ（割引率、ウラン価格、成形加工単価、再処理単価、濃縮単価）とその値は 5.2 節で述べたものを用い、5wt%燃料導入に伴う成形加工・再処理単価の増加を考慮した。さらに、5.2.4 節で示したエルビアペナルティについても考慮している。結果を図 5.5 に示す。

図 5.5 より、基本的な傾向として、燃料サイクルコストは燃料濃縮度が増加するに従って減少する。これは、濃縮度増加に伴って取出燃焼度が向上し、燃料一体あたりの発生エネルギーが増加することにより、燃料サイクルコストが減少するためである。評価にあたっては比較のため Reference ケースとして、濃縮度 5wt%燃料導入に伴う追加コスト（設備投資や取扱量低下に伴うコスト）が一切生じないと仮定した理想状態についても考慮した。

前述の通り、基本的な傾向として、燃料サイクルコストは燃料濃縮度が増加するに従って減少するが、Reference ケースでも濃縮度 9wt%あたりで減少傾向は飽和し、それ以上の濃縮度では必ずしも燃料サイクルコストは減少しない結果となった。換言すれば、濃縮度が上がれば上がるほど燃料サイクルコストが減少する訳ではないということとなる。これは、ある濃縮度以上になれば、取出燃焼度が向上することによる正の効果よりも、ウラン資源の採鉱費や濃縮費が増加する負の効果の方が大きくなるためと考えられる。

エルビアクレジットを用いずに濃縮度が増加することによる臨界安全上の要求に対応する Opt0 ケースでは、燃料の濃縮度が増加するほど Reference ケースと比べた際の燃料サイクルコストの増加は大きくなっている。これは主に高濃縮度におけるウランの取扱量低下による経済性悪化の影響である。Opt0 ケースでは、燃料サイクルコストは濃縮度 7–8wt%程度で最小となり、その後は次第に増加傾向となっている。Reference ケースに対する Opt0 ケースの経済性悪化は濃縮度 9wt%において約 3 \$/MWh に達している。

これに対し、エルビアクレジットを用いた Opt1 ケースおよび Opt2 ケースでは、Opt0 ケースに比べて燃料サイクルコストは大幅に改善されている。Reference ケースと比較してもその差は微小であり、濃縮度 9wt%において 0.2 \$/MWh 程度の増加である。この差の要因はエルビアペナルティに起因するものであり、これはエルビアを使用する以上、不可避の効果といえる。

ここで特筆すべきことは、再転換施設の設備投資を考慮した **Opt2** ケースにおいて、**Opt1** ケースと比較した場合の経済性の悪化はごく僅かであることである。これは、成型加工業者にとって再転換施設の設備投資は非常に大きなリスクのある投資ではあるが、燃料サイクルコスト全体からみれば、実は無視できる程度の影響しかないということである。したがって、オプション 2 の実現のためには、成型加工業者の投資リスクを低減あるいは分散化するための施策が非常に重要となる。例えば、

- ・ 複数の成型加工業者が共同出資して新規の再転換施設を建設し、リスクを分散・共有する
- ・ 燃料サイクルコスト低減の受益者である電力会社に出資を仰ぎ、共同で新規再転換施設を建設する
- ・ エネルギー安定供給の観点から、国策として国家からの融資あるいは投資によって新規再転換施設を建設する

などにより、オプション 2 の実現が促進されることが考えられる。

なお、表 5.3 にて記述している通り、オプション 1 においては許認可に関わる投資を無視している。これについては、許認可費用よりもはるかに大きな設備投資を伴うオプション 2 と 1 の差が微小であることを鑑みれば、燃料サイクルコスト評価の観点からは妥当な仮定であると言える。

5.3.3 発電コスト

次に本節では、5.3.2 節で算出した燃料費を考慮した際の発電コストへの影響を示す。各々のケース毎に得られた発電コストの評価結果を図 5.6 に示す。

今回の評価では、燃料濃縮度の増加に伴う運転サイクル長の増加を考慮しているので、稼働率の向上と代替コストの低減による経済効果への影響が把握できる。燃料のバッチサイズは前節と同様 3 バッチに固定し、燃料濃縮度に対する運転サイクル長は一点炉モデルを用いて計算した。

図 5.6 より、発電コストにおいては燃料サイクルコストで見られたような濃縮度 9wt% 付近で最少値を示す傾向は無く、今回評価した範囲においては単調に減少し続けることがわかった。これは、燃料サイクルコストの議論で述べたウラン資源の採鉱費や濃縮費の増加よりも、稼働率が向上したことによる正の効果の方が依然として大きいためであると考えられる。

また、エルビアクレジットの適用により、**Opt1** ケースと **Opt2** ケースは依然として **Opt0** ケースと比べて顕著な経済性向上効果がみられた。しかしながら、その効果は燃料サイクルコストで見られた効果よりは僅かに少なくなっている。これは、エルビアの混入に伴って生じるエルビアペナルティの影響により、エルビアを混入させない場合と

比べてサイクル長が若干減少するため、稼働率が減少するためである。

エルビアクレジットの利用により、今回評価した濃縮度 5－9wt%の範囲においては発電コストが有意に改善する効果がみられ、その経済性改善効果は濃縮度 9wt%において 1.0 \$/MWh 程度であることが分かった。

さらに、Opt1 ケースと Opt2 ケースの差は燃料サイクルコストの評価時よりもさらに小さくなり、再転換施設を新規に建設するコスト上昇が発電コスト全体に占める影響は小さいことがわかった。繰り返しになるが、それでも新規の再転換施設の建設は成型加工業者にとってはリスクの大きな投資となるため、投資リスクを低減あるいは分散化するための適切な措置が必要である。

5.4 考 察

5.4.1 感度解析

本研究の目的は、エルビアクレジットの開発において当該燃料の導入は現に現状の課題を解決するポテンシャルがあり、開発を継続する価値があることを確認することである。そのため、他電源との絶対値の比較など詳細な経済性評価の実施は本研究の意図するところでは無い。この観点から、5.3 節まではある典型的な仮定を置いて経済性評価を実施し、エルビアクレジットに経済優位性があることを示した。

しかしながら、そこで得られた優位性は前提とした仮定の下でのみ得られたものであるとの可能性もまた否定できない。このため、本節では燃料運用やコストパラメータの値についていくつかの感度解析を実施し、より一般的にエルビアクレジットの経済優位性を確認することを目的とする。具体的には、

- ・ バックエンドコストの増加を考慮した評価
- ・ バッチ数固定で無くサイクル長固定の燃料運用での評価
- ・ 異なるコストパラメータセットでの評価

を実施する。

1) バックエンドコストの増加

5.3 節までの評価では、再処理コストは濃縮度 5wt%以下を前提とした現時点の取出燃焼度に対応する再処理単価（2630 \$/kgU）と同一とした。これは、高燃焼度化した場合でも、発電所の使用済燃料プールでの冷却時間を十分とれば従来燃料と同等の熱・被曝量に低減できるためである。

一方、当節では感度解析として、OECD/NEA レポートの手法¹⁾に倣い、取出燃焼度に比例して再処理コストが増加すると仮定して燃料サイクルコストおよび発電コスト

を評価した。具体的には取出平均燃焼度 55 GWd/t に対応する再処理単価を基準の 2630 \$/kgU とし、取出燃焼度に比例して再処理コストが増加することとする。このようなモデルを仮定した場合、濃縮度 9wt%の際に取出燃焼度は約 100 GWd/t となるため、再処理単価は約 2 倍となる。

燃料サイクルコストと発電コストの評価結果を図 5.7 と図 5.8 にそれぞれ示す。これらの図において、実線は基本評価としてバックエンドコストの増加を考慮していない前節までの結果であり、破線は感度解析としてこれを考慮した結果である。

図 5.7 より、バックエンドコストの増加を考慮すると燃料サイクルコストは濃縮度の増加とともに著しく上昇している。エルビアクレジットを採用した場合においても、燃料サイクルコストは濃縮度 7–8wt%付近で最小となり、その後は次第に増加傾向となっている。実際は、仮定したコストパラメータ（割引率、冷却期間、中間貯蔵の有無と期間など）の値によって、その増加量はさらに変化する。これらより、バックエンドコストの増加を考慮した場合は燃料サイクルコストはエルビアクレジットを用いた場合でも必ずしも改善しないと言える。つまり、燃料サイクルコストの増加を燃料メーカーが負担する、即ち価格に上乗せできない場合には、濃縮度 6wt%以上の燃料を導入するインセンティブは働かないと言える。

一方図 5.8 より、発電コストについては、評価した濃縮度 9wt%以下の範囲においてはバックエンドコストの増加を考慮した場合でも単調に低下している。これは濃縮度 5wt%超燃料の導入は例えバックエンドコストが増加し燃料サイクルコストも増加したとしても、発電者である電力にとってはメリットがあるということを示している。

これらの評価により、バックエンドコストの増加を考慮した場合でもエルビアクレジットは発電コストの低減に大きく寄与することが示された。

2) サイクル長固定の運用

5.3 節の基準評価では、バッチ数は 3 に固定し、濃縮度の増加に伴いサイクル長が増加する運用を前提として評価していた。これに対しこの節では、サイクル長を固定し濃縮度の増加によってバッチ数が増加する運用にて比較する。ここではサイクル長を 13.5 EFPM（我国における標準的な運転サイクル長）、18、24 EFPM（将来の長期運転サイクル長）の 3 ケースについて比較した。比較ケースの詳細は表 5.4 に示している。

燃料サイクルコストと発電コストの評価結果を図 5.9 と図 5.10 にそれぞれ示す。図において、破線は Reference ケースを示しており、実線は Opt0 と 2 の結果を示している。

図 5.9 より、サイクル長が増加するほど燃料サイクルコストは増加することがわかる。特に注目すべきは短いサイクル長ほど Opt2 のメリットが少なくなることである。これは短サイクルほどエルビアペナルティの効果が顕著になり、エルビアクレジットのメリットを相殺するためである。しかしながら、濃縮度 8wt%程度以下の範囲であれば、そ

のようなデメリットを考慮しても Opt2 は Opt0 よりも経済性に優れた結果となっている。

一方発電コストに関しては、図 5.10 に示すように、燃料サイクルコストとは逆にサイクル長が長くなるほど減少する傾向がわかる。Opt0 と Opt2 の相関（相対差）は燃料サイクルコストと同様で、短サイクルほどエルビアペナルティが顕著となり、エルビアクレジットのメリットを相殺してしまう。しかしながら、そもそもエルビアクレジットを導入する目的は高燃焼度燃料を用いて長サイクルを達成し、発電コストを低減することであることを鑑みれば、短サイクルにおけるエルビアペナルティの実害が顕在化することは無いと考えられる。

3) 異なるコストパラメータセット

別の感度解析として、本節では前提条件の異なるコストパラメータを用いた場合の評価を行う。前節までの検討では電事連が示した日本国内を前提としたパラメータを用いていたが、ここでは OECD が示した欧米を対象としたコストパラメータ⁷⁾を用いることとする。値は表 5.5 に示している。表 5.1 と表 5.5 の比較により、成型加工コストとバックエンドコストは OECD の値の方が有意に小さな値となっている。これらの評価結果の比較により、幅広い範囲のコストパラメータの影響の把握が可能となる。個々の検討ケースについては表 5.4 に示したものと同一である。

燃料サイクルコストの評価結果を図 5.11 に示す。図 5.11 において、破線は Reference ケースを示しており、実線が Opt0 と Opt2 をそれぞれ示している。

図 5.11 からわかるように、OECD のパラメータを用いた燃料サイクルコストの評価においては、電事連のパラメータで得られた値より顕著に低い値となった。エルビアクレジットを用いたケースにおいても燃料サイクルコストは 6–7wt%付近で最小値をとる結果となり、その後コストは上昇する結果となった。前述したとおり、コスト評価の前提如何によっては、燃料サイクルコストは必ずしも燃焼度を増加するほど減少するとは限らないといえる。しかしながら、エルビアクレジットは燃料サイクルコストを低減させるためには非常に効果があることは図 5.11 から、明らかである。

5.4.2 供給シナリオ

エルビアクレジットを実導入するにあたり、前節で述べた経済性評価の結果を踏まえ、エルビアクレジットの効果を最大化するための実用化シナリオについて検討する。

これまで述べてきたとおり、エルビアクレジットとは UO_2 ウラン粉末全量にエルビア粉末を適量混入させることにより、加工施設の未臨界性を担保するコンセプトである。よって、燃料ウラン粉末へのエルビア混入施設の観点から、エルビアクレジット燃料の供給シナリオについて検討する。

日本においては、現時点では濃縮の 100%と再転換の約 2/3 を海外に依存している状況を考慮し、まずは初期投資の小さいオプション 1 により 5wt%超燃料を実用化する。このときの濃縮度は 6－7wt%程度までと考えられる。将来的にさらに供給セキュリティの向上のためには、オプション 2 により国内で濃縮および再転換を実施することが望ましい。

その際は、青森県六ヶ所村に建設されている濃縮施設の濃縮度制限を 5wt%超に向上させ、同一敷地内に再転換施設を併設するのが妥当である。

さらに、5wt%超の UF₆ の国際間輸送が可能となるならば、濃縮のみ海外で実施し、再転換後のエルビア混入は国内で実施するシナリオもあり得る。すなわち、六ヶ所村に建設する国内再転換施設で国内外全ての 5wt%超ウランに対するエルビア混入工程を集約するものである。この場合、六ヶ所村の再転換施設では国内濃縮および海外濃縮の全ての日本向けウランを処理し、かつ、国内の複数の成型加工施設にエルビア混入済のウラン粉末を混入することとなり、より効果的に投資リスク分散とスケールメリットの実現が可能となる。その際、特定加工指針の適用を受けるのは六ヶ所村施設構内のみに限定され、再転換後のウラン燃料粉末の輸送以降は、エルビアクレジットの適用により既存の国内インフラを最大限活用できることが期待できる。新規の再転換施設の設備投資は必要となるが、発電コストに占める影響は小さく、供給セキュリティの確保と比較して、十分妥当性のあるオプションである。

が、オプション 2 の実施是非の判断は

- ・高濃縮度（7wt%以上）の必要性
- ・エルビアペナルティを解消する技術開発
- ・供給セキュリティの緊迫度

を総合的に加味して決定されることになるであろう。まずはコストが最も安いオプション 1 の実現を図りつつ、将来的には供給セキュリティの観点からオプション 2 を目指すシナリオが現実的である。

このようにエルビアクレジットを活用し、国内外の濃縮・再転換・加工プロセスのベストミックスを検討しつつ、新規インフラの合理的導入と既存インフラの有効活用を図る施策の実現が重要である。

5.5 まとめ

原子力発電所における使用済燃料の発生量抑制のためには、濃縮度 5wt%超燃料の実現が必要である。濃縮度 5wt%超燃料を導入するための有効な手段として、本研究では『エルビアクレジット燃料』を提案している。本章ではこのエルビアクレジット燃料について、その経済性効果、供給シナリオを検討した。

経済性効果の確認においては、下記の項目に注目し、燃料サイクルコストおよび発電コストの評価を実施した。

- ・ 高燃焼度化と長サイクル運転による稼働率向上による経済性向上効果
- ・ 臨界安全性の観点から取扱量が減少する効果
- ・ 特定加工指針に対応するための資本費（設備投資）増大の効果
- ・ エルビアペナルティによって中性子経済が悪化する効果

まずは効果を確認するためのエルビアクレジット導入シナリオについて、特にフロントエンド側に着目し、国内外の規制や海外の動向などについて述べ、これを踏まえて比較検討を行うケース設定を行った。次に評価を行うため、燃料濃縮度に対する運転サイクル長および取替体数を評価するためのツールを整備し、エルビアの使用の際に課題となるエルビアペナルティを考慮するモデルを開発した。

評価の結果、濃縮度向上に伴い高燃焼度化が図られるため、基本的に発電コストは減少傾向となり、濃縮度 5－9wt%の範囲においては、発電コストは最大で 1.0 \$/MWh 程度の低減効果があることを確認した。一方で、濃縮度 5%超燃料の導入に伴い、臨界質量の観点から成型加工施設の燃料取扱量が減ること、設備投資に伴う資本費が増大することから、燃料サイクルコストの傾向は一義的でないことを指摘した。

これらを踏まえて日本における濃縮度 5wt%超エルビアクレジット燃料導入シナリオについて検討した。その結果、濃縮度 6wt%程度までなら海外の濃縮施設および再転換施設を活用し、当該燃料の実現を図るのが現実的であることを示すとともに、それ以上の濃縮度の燃料については、

- ・ 高濃縮度（7wt%以上）の必要性
- ・ エルビアペナルティを解消する技術革新
- ・ 供給セキュリティの緊迫度

を勘案し、日本国内で濃縮・再転換を実施することが有効であることを指摘した。

今回の検討により、エルビアクレジットにより既存の設備改造が不要となり生産性の向上による経済的メリットが期待できることがわかった。エルビアクレジットの導入は、濃縮度 5wt%超燃料を用いた燃料運用シナリオの実現を促進し、原子力エネルギーの経済性向上および供給安定性に貢献することを確認した。

表 5.1 コストパラメーター一覧

Front end	Natural uranium mining and milling	55	\$/kgU _{nat}
	Conversion processes	8	\$/kgU _{nat}
	Enrichment	170	\$/tSWU
	Fuel fabrication	800 - 2160*	\$/kgU
Back end	Transportation of spent fuel	180	\$/kgU
	Fuel intermediate storage	610	\$/kgU
	Reprocessing	2630 - 4930†	\$/kgU
	Decommissioning of reprocessing plant	200	\$/kgU
	HLW Storage	250	\$/kgU
	Transportation	30	\$/kgU
	disposal	740	\$/kgU
	TRU waste processing	250	\$/kgU
	Storage	250	\$/kgU
	disposal	350	\$/kgU

*) Increase by throughput reduction and capital investment is considered.

†) Increase caused by higher discharge burn-up is considered.

表 5.2 比較条件の一覧

Option	Step 1 Enrichment	Step 2 Transport of UF ₆	Step 3 Reconversion	Er addition	Step 4 Transport of UO ₂	Step5 Fabrication	Step 6 Transport of fuel assy.
Reference	Ideal case in which no modifications are necessary even when >5wt% enrichment fuel is used.						
0	Currently licensed or licensing underway	Investment for cylinder is necessary Can be eliminated by co-location of step 1 and 2	Investment for facility modification is necessary	No	Investment for cask is necessary Throughput reduction because of criticality safety requirement	Investment for facility modification is necessary Throughput reduction because of criticality safety requirement	Investment for cask is necessary Throughput reduction because of criticality safety requirement
1	Currently licensed or licensing underway	Investment for cylinder is necessary Can be eliminated by co-location of step 1 and 2	Only licensing is necessary (up to 6 wt% enrichment level)	Yes	No throughput reduction owing to erbia credit	No throughput reduction owing to erbia credit	No throughput reduction owing to erbia credit
2	Currently licensed or licensing underway	Investment for cylinder is necessary Can be eliminated by co-location of step 1 and 2	Investment for new facility is necessary (more than 6 wt% enrichment level)	Yes	No throughput reduction owing to erbia credit	No throughput reduction owing to erbia credit	No throughput reduction owing to erbia credit

*) Steps 2 to 6 are included in the fuel fabrication cost, because these steps are performed by the fabrication vendor.

表 5.3 成型加工費の数値一覧

Option	Description	Enrichment (wt%), ε	Fabrication cost based on FEPC (\$/kgU)						Fabrication cost based on OECD (\$/kgU)					
			5	6	7	8	9	10	5	6	7	8	9	10
Reference	Fabrication cost = Capital+Operational+Material, Capital:Operational:Material = 10:60:30		800	800	800	800	800	800	300	300	300	300	300	300
0	Capital: $\times 2 \times \alpha(\varepsilon)$ Operational: $\times \alpha(\varepsilon)$ Material: no change		880	1136	1392	1648	1904	2160	330	426	522	618	714	810
1	Capital: no change (licensing cost is ignored) Operational: no change Material: no change		800	800	800	800	800	800	300	300	300	300	300	300
2	Capital: $\times 1.5$ Operational: no change Material: no change		840	840	840	840	840	840	315	315	315	315	315	315

表 5.4 比較ケースの一覧

Case		Base case	Perturbation cases				
Cost parameters		FECP Parameter	FEPC Parameter				OECD Parameter
Strategy		3-batch fixed	3-batch fixed	Cycle length fixed			3-batch fixed
Back-end cost		Const	Linearly increases	Const			Const
Option	Reference	Ref	Ref-BE	Ref-13M	Ref-18M	Ref-24M	Ref-OECD
	0	Opt0	Opt0-BE	Opt0-13M	Opt0-18M	Opt0-24M	Opt0-OECD
	1	Opt1	---	---	---	---	---
	2	Opt2	Opt2-BE	Opt2-13M	Opt2-18M	Opt2-24M	Opt2-OECD
Corresponding figures		図 5.4, 5.5, 5.6	図 5.7, 5.8	図 5.9(a), 5.10(a)	図 5.9(b), 5.10(b)	図 5.9(c), 5.10(c)	図 5.11

表 5.5 コストパラメーター一覧 (by OECD)

Front end	Natural uranium mining and milling	50	\$/kgU _{nat}
	Conversion processes	7	\$/kg U _{nat}
	Enrichment	90	\$/kg SWU
	Fuel fabrication	300*	\$/kg U
Back end	Transportation of spent fuel	230	\$/kg U
	Spent fuel encapsulation and disposal	610	\$/kg U

* Increase by throughput reduction and capital investment is considered.

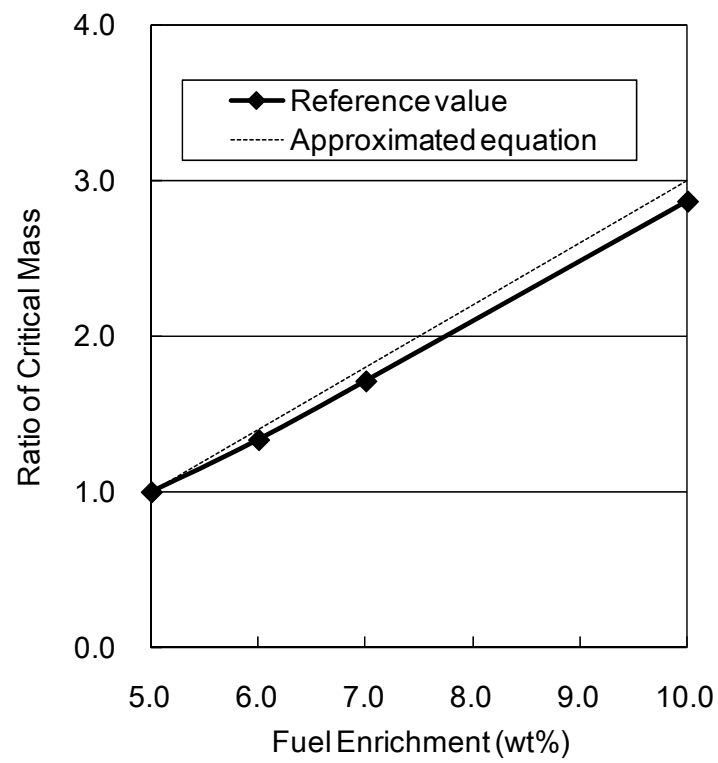
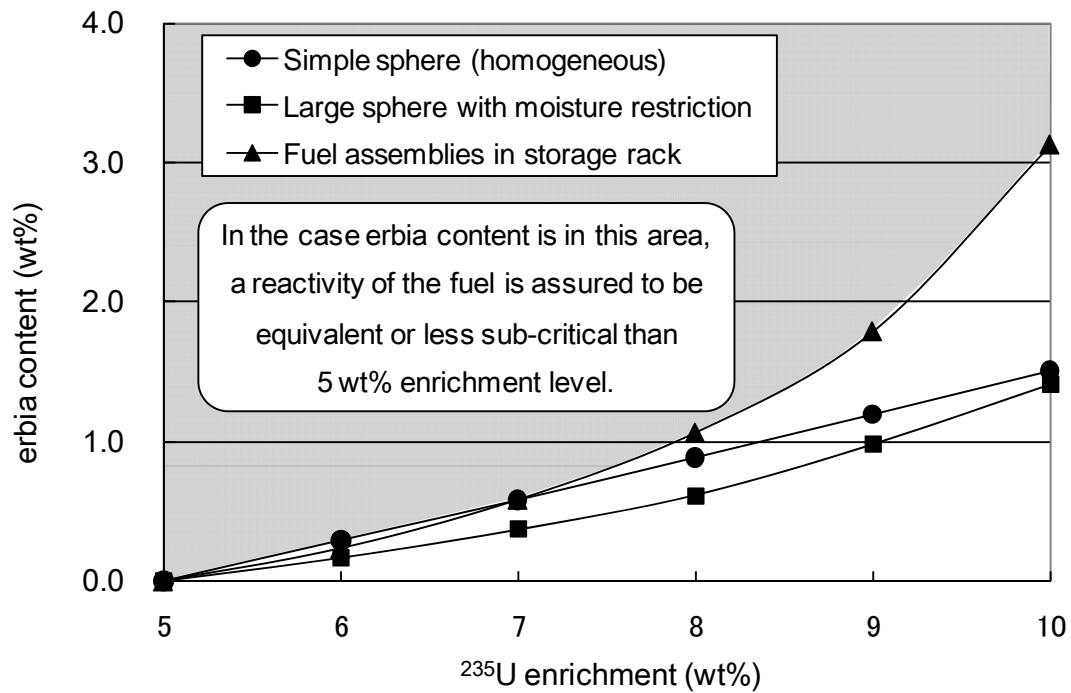


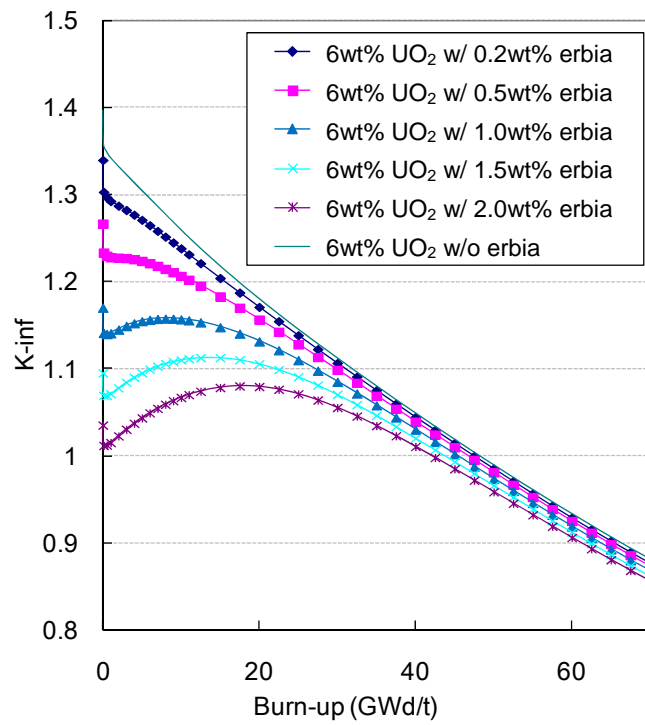
図 5.1 燃料濃縮度と臨界質量の相関*

(* The values of Critical Mass are referred from reference 10.)

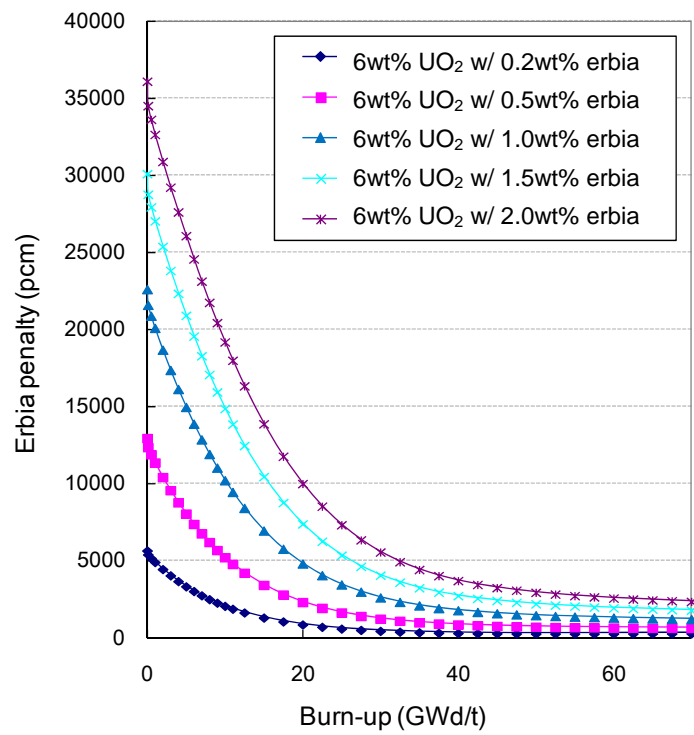


☒ 5.2 ECOS (Erbium COntent for Sub-criticality judgment) ☒

(A summary of the maximum erbium content necessary for each case, whose envelope corresponds to the minimum erbium content required for a suitable erbium credit.)



a) Fuel Reactivity let-down



b) Erbium Penalty

図 5.3 エルビアペナルティの燃焼度依存性評価結果

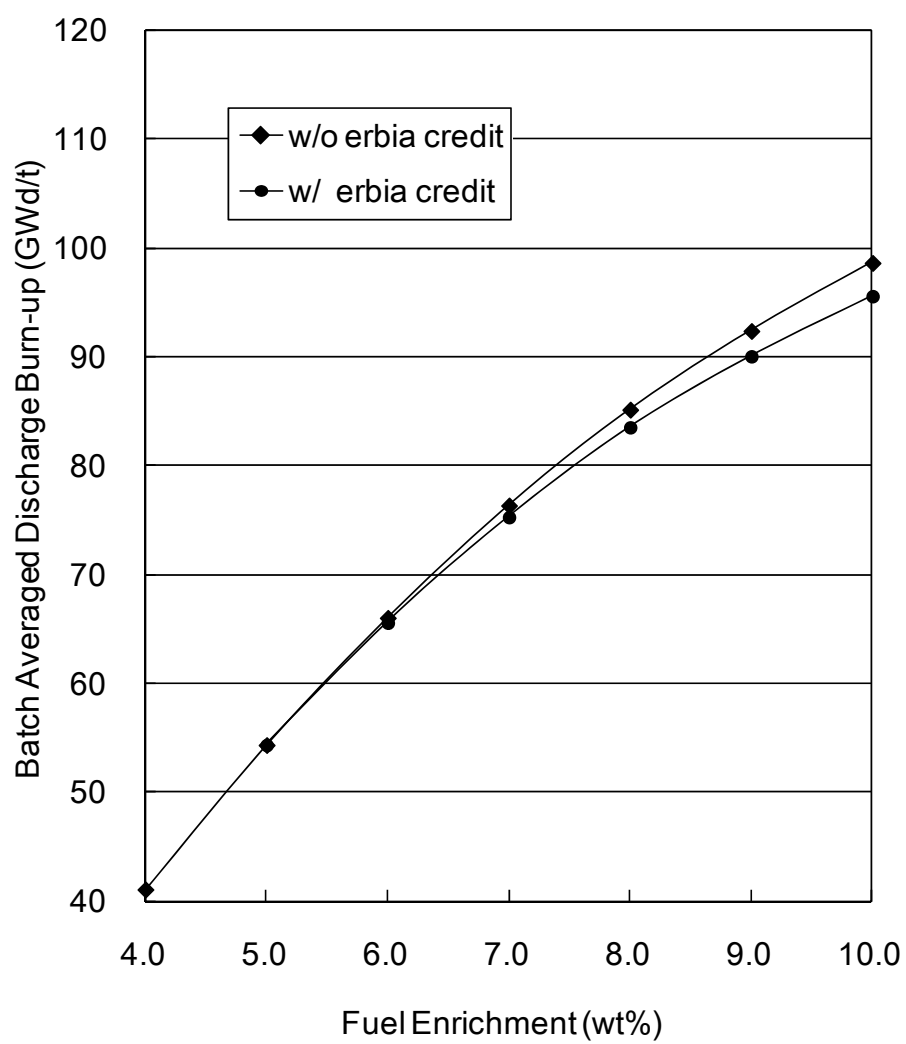


図 5.4 バッチ平均取出燃焼度の燃料濃縮度依存性の比較（エルビア有・無）

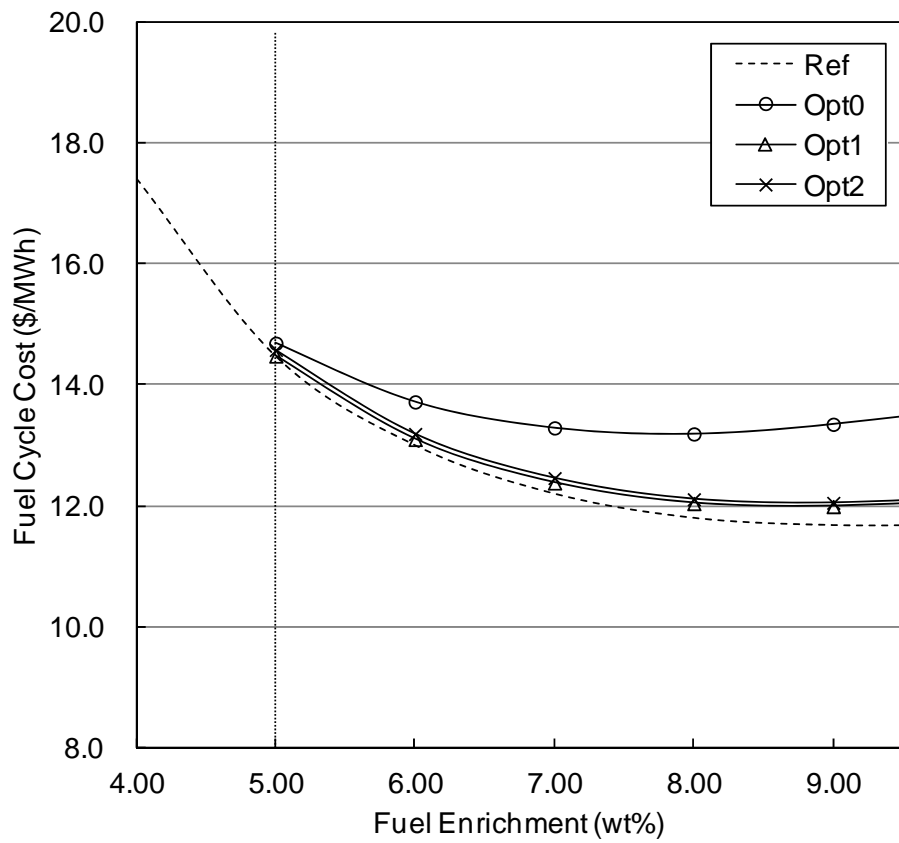


図 5.5 燃料サイクルコスト評価結果

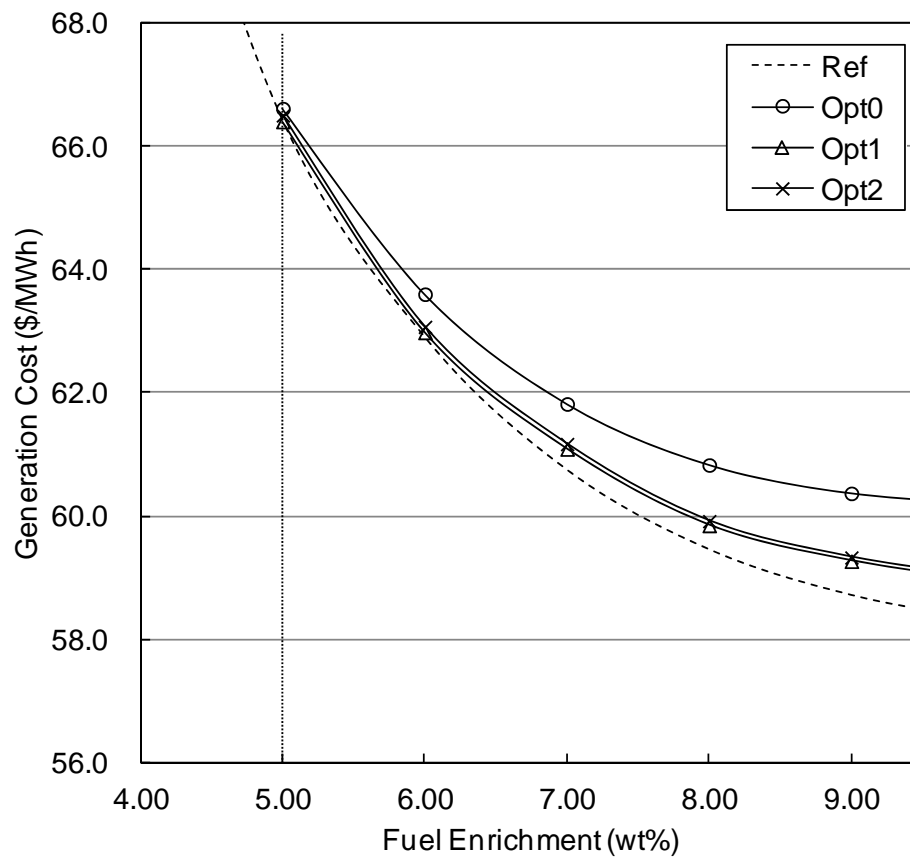


図 5.6 発電コスト評価結果

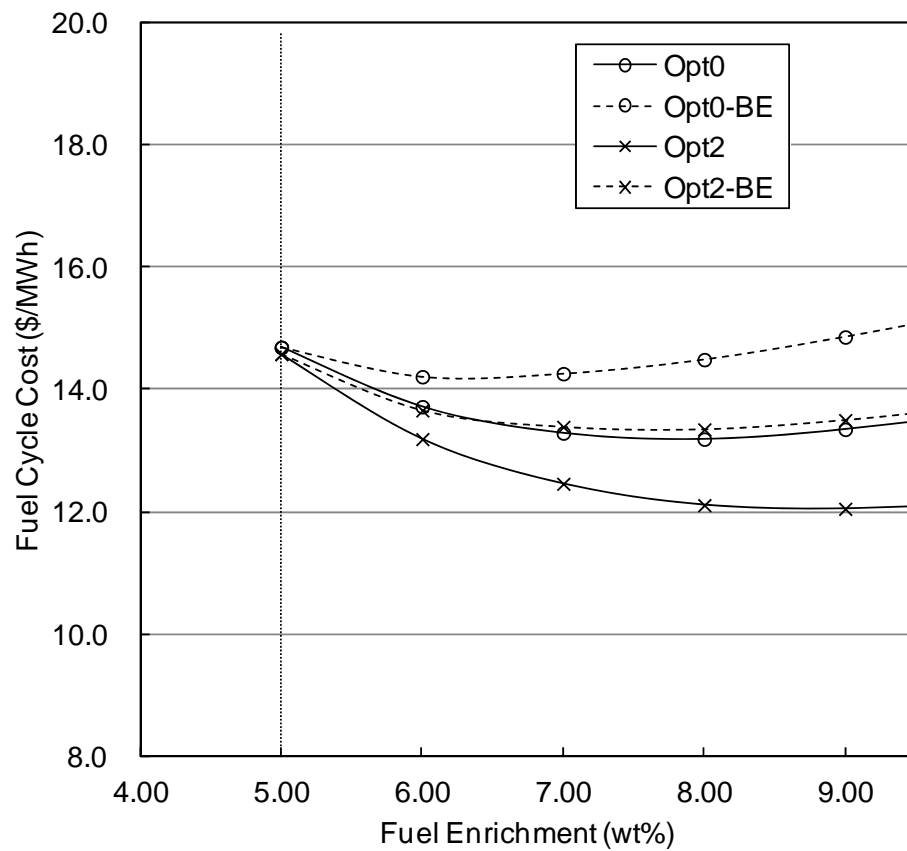


図 5.7 燃料サイクルコスト評価結果
(バックエンドコストの増加を考慮)

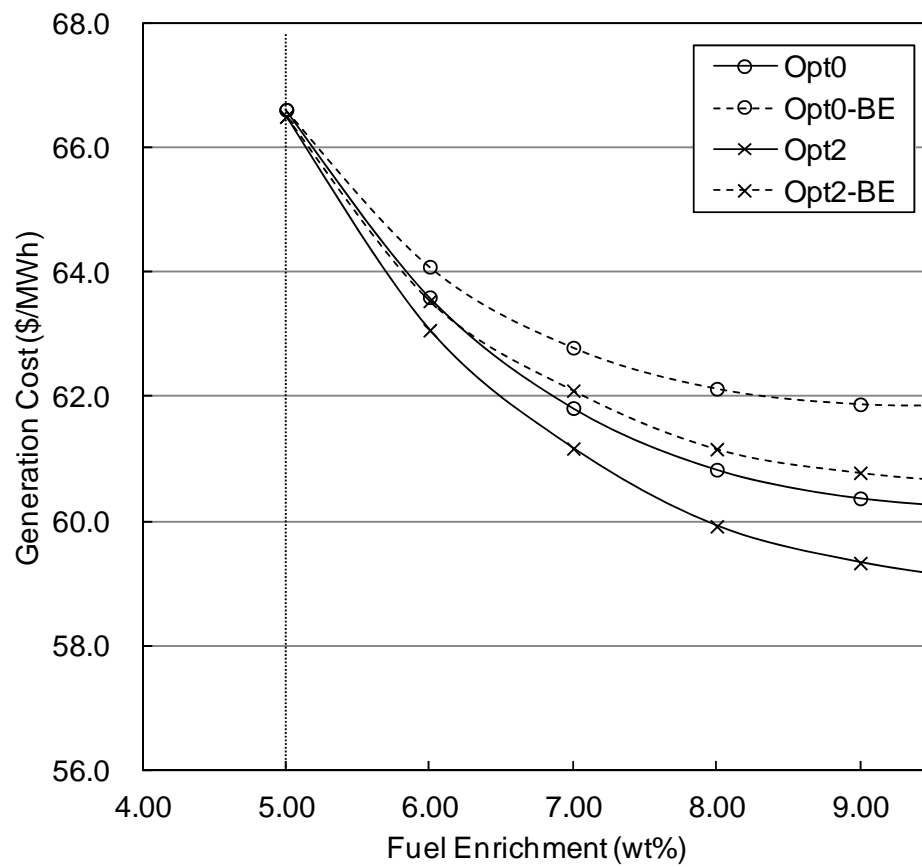


図 5.8 発電コスト評価結果
(バックエンドコストの増加を考慮)

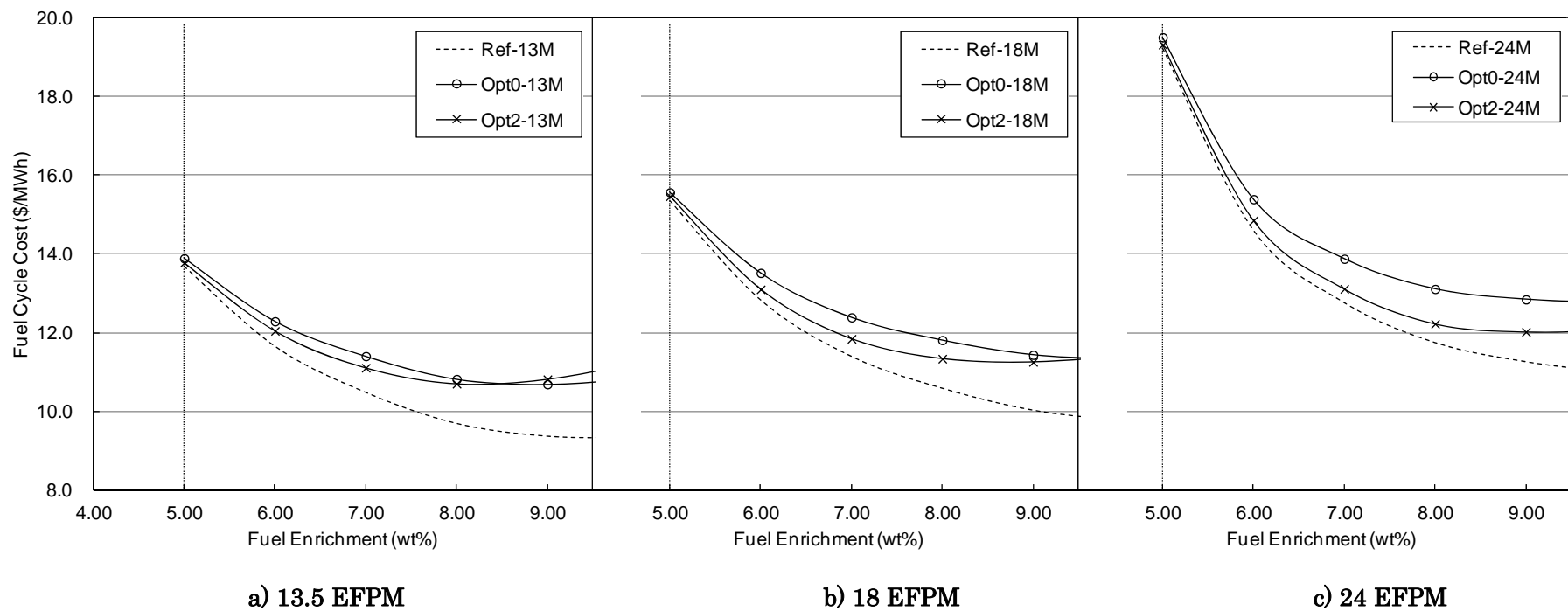


図 5.9 燃料サイクルコスト評価結果 (固定サイクル長での評価)

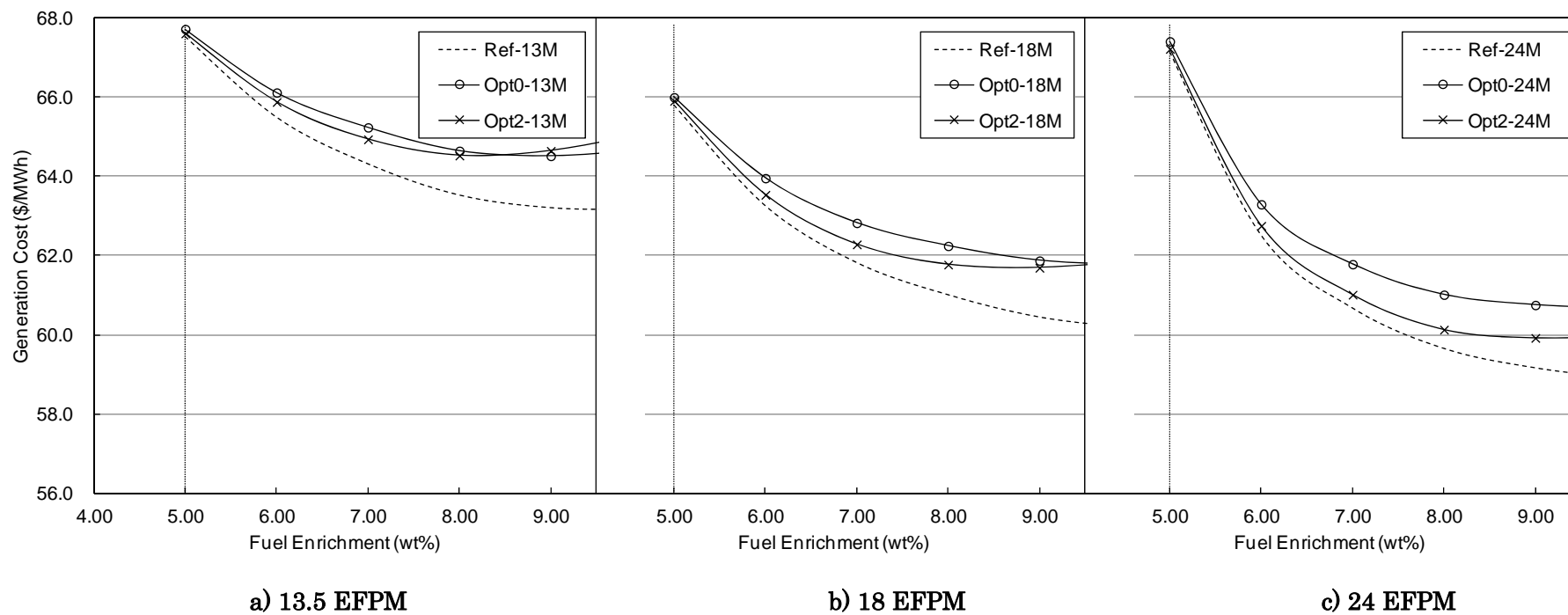


図 5.10 発電コスト評価結果 (固定サイクル長での評価)

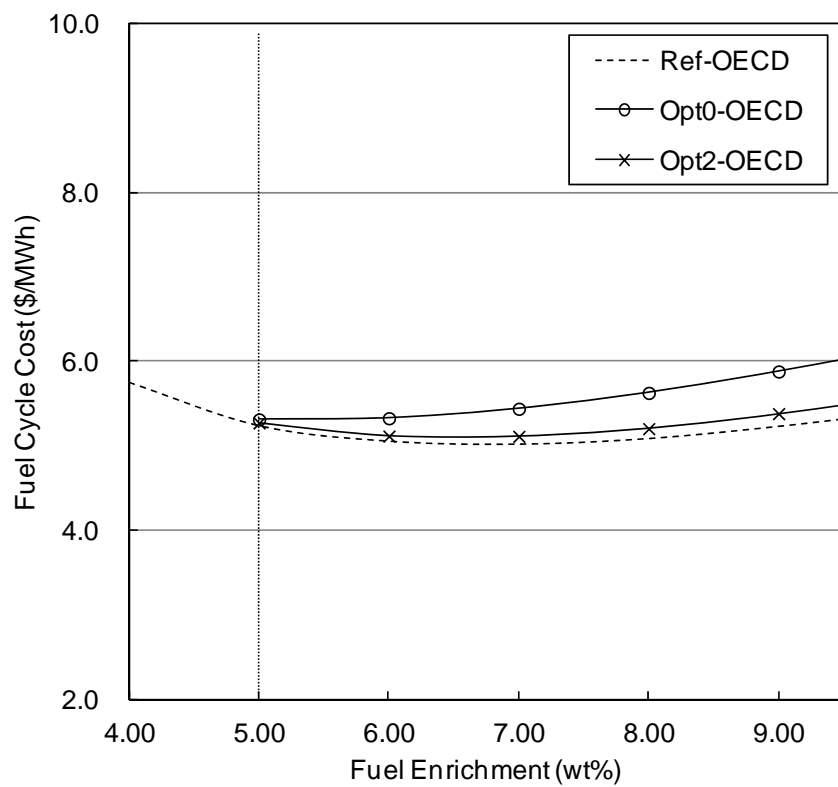


図 5.11 燃料サイクルコスト評価結果 (OECD コストパラメータ使用)

【第 5 章の参考文献】

- 1) "Very High Burn-ups in Light Water Reactors," NEA No. 6224, ISBN 92-64-02303-8, OECD, (2006).
- 2) "IAEA SAFEGUARDS GLOSSARY 2001 Edition, INTERNATIONAL NUCLEAR VERIFICATION SERIES No. 3," IAEA, June, (2002).
- 3) "Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Fuel Cycle Facility," NUREG-1520, Rev. 1, US.NRC, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, May, (2010).
- 4) 「特定のウラン加工施設のための安全審査指針」（平成 12 年 9 月 25 日 原子力安全委員会決定）.
- 5) 「モデル試算による各電源の発電コスト比較」, 電気事業連合会, (2004 年 1 月) .
- 6) 「コスト等検証委員会報告書」, エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会, (2011 年 12 月) .
- 7) "The Economics of The Nuclear Fuel Cycle," OECD/NEA, Committee for Technical and Economic Studies on Nuclear Development and the Fuel Cycle (NDC), (1994).
- 8) 辻蔵 米蔵, 神田 啓治, 「次世代 PWR の運転サイクル長期化の可能性に関する評価」, 日本原子力学会誌, Vol. 41, No. 8, (1999).
- 9) 「核燃料サイクルコスト計算ソフトの作成と計算結果の公開について(第 2 報)」, 山地研究室, 東京大学 工学部 電気電子工学科, 東京大学 大学院 工学系研究科 電気系工学専攻, 東京大学 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻, (http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/yamaji/index_j.html), (2004 年 8 月) .
- 10) 「臨界安全ハンドブック データ集第 2 版」, JAEA-Data/Code 2009-010, 日本原子力研究開発機構安全研究センター 原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット, (2009 年 6 月) .
- 11) M. J. Driscoll, T. J. Downar and E. E. Pilat, "The Liner Reactivity Model for Nuclear Fuel Management," ISBN 0-89448-035-9, American Nuclear Society, (1990).
- 12) M. Edenius, K. Ekberg et al., "CASMO-4, A Fuel Assembly Burnup Program, User's Manual," STUDSVIK/SOA-95/1, Studsvik of America, Inc., (1995).
- 13) D. Knott, B. H. Forssén et al., "CASMO-4, A Fuel Assembly Burnup Program, Methodology," STUDSVIK/SOA-95/2, Studsvik of America, Inc., (1995).
- 14) F. Franceschini, B. Petrovic, "Use of Isotopically Modified Erbium in Advanced LWR Fuel," Proc. Workshop on Advanced Reactors With Innovative Fuels (ARWIF- 2008), Tsuruga, Fukui, Japan, February 20-22, (2008).

第6章 結 論

本章では，本研究によって得られた成果をまとめ，その意義を明確にするとともに，それらを踏まえてエルビアクレジット燃料の今後の展望について述べる。

6.1 本研究の成果

濃縮度 5wt%を超える燃料の導入により，原子炉利用の高効率化，使用済燃料の削減が可能となり，原子力エネルギーの安定かつ安価な供給に資することができる。この濃縮度 5wt%超燃料の実用化を促進するため，本研究では下記を実施した。

- ・ 課題の指摘と解決策としてのエルビアクレジットの提案（第 2 章）
- ・ 実験による核特性データの取得とこれを用いて評価ツールの妥当性確認（第 3 章）
- ・ 臨界安全性評価の実施とエルビアクレジットにおけるエルビア濃度の提示（第 4 章）
- ・ 実用化による経済性効果の確認と実用シナリオの検討（第 5 章）

本研究によって得られた成果について，以下にまとめる。

6.1.1 エルビアクレジットの提案

原子力発電所における使用済燃料の発生量抑制のため，燃料の濃縮度を 5wt%超に上昇させた高濃縮度燃料について，特にフロントエンド側に着目し，国内外の規制や海外の動向などについて調べた。その結果，濃縮度が 5wt%を超過する際，日本国内で規制上の取扱が異なるのは再転換および加工施設のみであり，その他の規制（核物質防護，輸送，核不拡散など）は，10wt%以下であれば 5wt%を超過しても同等の扱いであることがわかった。

濃縮度 5wt%超燃料の導入に伴う懸案の大部分を解決し，既存のインフラを有効活用するための解決策としてエルビアクレジットの概念を提案した。エルビアクレジットは濃縮度 5wt%を超える全てのウラン燃料について再転換後に低濃度のエルビア（酸化エルビウム； Er_2O_3 ）を混入し，濃縮度 5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保することにより，それ以後の輸送や成型加工施設における臨界安全上の設計変更を不要とするという概念である。このエルビアクレジットを用いたエルビア入り次世代高燃焼度燃料（エルビアクレジット燃料）は，高濃縮度燃料の利点を活かしつつ，大幅な設備変更・設備投資を回避できる画期的な燃料である。輸送量，加工量，貯蔵量など取扱量も減少させる必要がないので，作業効率・輸送効率・貯蔵効率の向上も期待できる。

エルビアクレジット燃料の供給オプションについては、国内外のベストミックスを目指しつつ、新規インフラの合理的導入と既存インフラの有効活用を図ることの重要性を指摘した。

6.1.2 エルビア臨界実験の実施

エルビアクレジット燃料の実用化に資する核特性データ取得のため、KUCA を使用してエルビア燃料の臨界実験を実施した。KUCA 実験においては、実機体系のパラメータ範囲を踏まえて、網羅的な炉心を構築するとともに、臨界性、エルビアサンプル反応度、および反応率分布を測定できた。本邦初となるこれら一連の実験の成功により、幅広い中性子スペクトル条件下におけるエルビアの反応度効果に関する系統的な実験データが取得できた。このような実験データは世界的にも他に類を見ないものであり、実験解析による核設計ツールの妥当性評価を通じて、エルビア含有燃料の核特性評価精度の検証に資することが期待できるものである。

KUCA において行った一連のエルビア入り燃料の模擬実験について、日本国内の標準的解析コードを用いて解析を行なった。その結果、MVP コードでは、何れの炉心においても実効増倍率の測定値と計算値の相対差は 0.4%以下で一致することがわかった。また、エルビア装荷と未装荷の炉心において実効増倍率の C/E 値に有意な差はなく、エルビアを装荷した場合でも未装荷の場合と同程度の計算精度で実効増倍率を評価可能であることがわかった。また、決定論的手法である SRAC コードを用いたエルビア板置換反応度効果の測定と計算の差は概ね数%程度であることがわかった。

以上のことから、現在の核特性解析手法は、エルビアの吸収効果を幅広い濃縮度および中性子スペクトル場に対して精度良く予測することが可能であると判断した。このことは、 ^{235}U 濃縮度や中性子スペクトルの変化によらずエルビアの吸収効果を解析により評価することが妥当であることを示している。

さらに、本研究で得られた測定データを用い、加工施設の臨界安全性評価コードとして広く用いられている KENO コードについても測定値との比較を行った。その結果、実効増倍率 k_{eff} の C/E はいずれのケースにおいても 0.997~1.003 の範囲内で一致し、参照コード MVP の結果と同等であり、KENO コードの信頼性を確認した。これにより、KENO コードを用いて臨界安全性評価を実施することは妥当であると判断した。

6.1.3 臨界安全性評価手法の提示

エルビアクレジットは、濃縮度 5wt%を超えるウラン粉末全てに薄くエルビアを混入させることにより、ウラン燃料の反応度を低下させ、濃縮度 5wt%以下の燃料と同等の臨界安全性を担保するコンセプトである。このため、任意のウラン濃縮度に対して、どれほどのエルビアを混入させれば濃縮度 5wt%以下と等価にできるかという、必要かつ十分な、最少エルビア混入量を決定することが必要である。

加工施設臨界評価では、実機加工施設を踏まえ、複雑形状にエルビアクレジットを適用した場合の臨界安全性評価を実施した。臨界安全性評価に用いた解析体系については、再転換工程直後にエルビアを混入してから原子炉新燃料ピットまでのフロントエンド全体を代表するように選定した。

各体系毎に得られた濃縮度 5wt%燃料と等価にするためのエルビア濃度を示し、必要な最小エルビア濃度の決定について議論した。各評価対象の濃縮度 5wt%超に対して、濃縮度 5wt%と等価な臨界安全性となるエルビア添加量を求めた。結果として得られた図の曲線の上側は未臨界と判定されることから、当該図を ECOS 図(**E**rbia **C**Ontent for **S**ub-criticality judgment diagram：エルビア添加量に関する未臨界判定図)と命名した。

得られた ECOS 図より、濃縮度 7wt%まではいずれの複雑形状も、未臨界となるエルビア所要量は単純形状と同等あるいはそれ以下であることが分かった。濃縮度 7wt%以上においては、減速条件付き大型容器は単純形状と同等であるが、集合体ラック体系については急激に増加し、単純形状を上回った。これは、体系間の中性子相互効果が存在する形状に起因した特徴と考えており、ECOS 図の作成において注意を要するものである。

評価によって得られた ECOS 図より、現行規制下の加工施設で未臨界性を担保するためのウラン濃縮度とエルビア添加量の組み合わせを判定できる。更には、ECOS 図を作成する上での複雑形状特有の留意点が明らかとなり、エルビアクレジットの臨界安全性評価手法として、貴重な知見を示した。

6.1.4 導入効果の確認

経済性効果の確認においては、

- ・ 高燃焼度化と長サイクル運転による稼働率向上による経済性向上効果
- ・ 臨界安全性の観点から取扱量が減少する効果
- ・ 特定加工指針に対応するための資本費（設備投資）増大の効果
- ・ エルビアペナルティによって中性子経済が悪化する効果

などの項目に注目し、燃料サイクルコストおよび発電コストの評価を実施した。

評価の結果、濃縮度向上に伴い高燃焼度化が図られるため、基本的に発電コストは減少傾向となり、濃縮度 5－9wt%の範囲においては、発電コストは最大で 1.0\$/MWh 程度の低減効果があることを確認した。一方で、濃縮度 5%超燃料の導入に伴い、臨界質量の観点から成型加工施設の燃料取扱量が減ること、設備投資に伴う資本費が増大することから、燃料サイクルコストの傾向は一義的でないことを指摘した。

これらを踏まえて日本における濃縮度 5wt%超エルビアクレジット燃料導入シナリオについて検討した。その結果、濃縮度 6wt%程度までなら海外の濃縮施設および再転換

施設を活用し、当該燃料の実現を図るのが現実的であることを示すとともに、それ以上の7-8wt%の濃縮度の燃料については、高濃縮度の必要性、エルビアペナルティを解消する技術革新、供給セキュリティの緊迫度、などを勘案し、日本国内で濃縮・再転換を実施することが有効であることを指摘した。

今回の検討により、エルビアクレジットにより既存の設備改造が不要となり生産性の向上による経済的メリットが期待できることがわかった。エルビアクレジットの導入は、濃縮度 5wt%超燃料を用いた燃料運用シナリオの実現を促進し、原子力エネルギーの経済性向上および供給安定性に貢献することを確認した。

6.2 本研究の意義

本研究では既に 6.1 節に示した通り、エルビアクレジットを用いた濃縮度 5wt%を超える燃料の導入に資する様々な知見やデータを取得した。

そもそも濃縮度 5wt%を超える燃料に対しては

- ・ 設計および許認可取得するための、濃縮度 5wt%を超える燃料の核特性データおよび設計コードの妥当性確認データが不十分である
- ・ 臨界安全の観点から大幅な設計変更、設備変更、再許認可が必要となり、膨大な投資が発生する懸念がある
- ・ 反応度の増加に伴い、取扱量を低減させる必要があるため、生産効率、貯蔵効率、輸送効率などが低下し、経済性を損なう
- ・ 濃縮度 5wt%超燃料の導入によるコストメリットが、これらの投資に見合うものか否か、見極めが難しい

などの懸念がかねてより指摘されており、世界的にも実用化に至っていなかった。

これに対して本研究では、濃縮度 5wt%を超える全てのウラン燃料について再転換後に低濃度のエルビアを混入し、濃縮度 5wt%以下のウラン燃料と同等の臨界安全性を担保することにより、それ以後の輸送や成型加工施設における臨界安全上の設計変更を不要とするという概念を提案した。これにより、濃縮度 5wt%超の高濃縮度燃料の利点を活かしつつ、大幅な設備変更・設備投資を回避することが可能となることを示した。さらに反応度が増加しないため輸送量、加工量、貯蔵量など取扱量も減少させる必要がないので、作業効率・輸送効率・貯蔵効率の向上も期待できることを定量的に確認し、濃縮度 5wt%超燃料の導入に伴う懸案の大部分を解決した。

また、このコンセプトを実用化するための技術的課題の解決を通じて、以下のような特筆すべき知見を得た。

- ・ これまで十分なデータが得られていない高ウラン濃縮度、低エルビア濃度、低水

分割合などの環境下でのエルビア核特性データの取得

- ・ 得られた核特性データを用い、濃縮度 5wt%超、エルビア混入体系における臨界安全性評価コードの妥当性を確認
- ・ これら核特性データと評価コードを使い、高濃縮度体系の様々な条件下での臨界安全性評価を行い、実用的なエルビア濃度の提示や硬スペクトル時の体系間相互効果の顕在化を指摘
- ・ さらには、濃縮度 5wt%燃料の導入によるコストメリットに関して、必要なエルビア濃度、それに伴うエルビアペナルティ効果を精緻に考慮し、エルビアクレジットを用いることで確かに投資に見合う利益が得られることを明確かつ定量的に確認

これらは、単にエルビアクレジットの実用化のみならず、広く今後の核設計、臨界安全設計に適用可能な貴重な知見およびデータである。

以上のように、本研究によって濃縮度 5wt%超燃料の導入に伴う懸案の大部分は解消され、当該燃料の実用化が促進されることが期待される。その結果、原子炉利用の高効率化、使用済燃料の削減、既存インフラの有効活用を実現し、原子力エネルギーの安定かつ安価な供給に資すると考えられる。

エルビアクレジット燃料は世界中が躊躇している濃縮度 5wt%燃料の実用化を可能とする革新的かつ画期的な概念であり、本研究によって取得された様々な知見は、今後の燃料開発における幅広い応用発展性を持つ技術として寄与するものである。

6.3 今後の展望

本研究では、新たなコンセプトであるエルビアクレジット燃料の実用化のため、エルビアの核特性データを取得、取得したデータを用いて設計ツールの妥当性を確認、エルビアクレジットを用いた臨界安全性評価、さらに発電コスト・燃料サイクルコストからみた導入効果の確認を実施した。表 6.1 として第 1 章で示した技術課題を再掲する。本研究によりエルビアクレジット燃料の成立性に関するこれらの課題はほぼ解決できたと考えられるが、より発展的な検討として実施が期待される課題を以下に列举する。

- ・ 更なる核特性データの拡充。特に燃焼特性や燃焼燃料組成におけるエルビアの核データの検証など。データの拡充と検証を継続し、得られたデータをより広範に世界での活用に資するため、国際ベンチマークとしての登録と公開の促進。
- ・ エルビアクレジットでは、当該燃料が濃縮度 5wt%の燃料と同等以下の未臨界性であることを担保するため、燃料サイクルの各工程において、燃料粉末中にエルビアが現に必要量存在していることを確認するための検認法の開発。

- ・ フロントエンドのみならず，バックエンドにおける濃縮度 5wt%超燃料の導入を促進するため，燃焼を通じた最大反応度を考慮したエルビアクレジットと燃焼度クレジットの概念の結合。（表 6.2 参照）
- ・ エルビアクレジットとは直接関係はないが，燃料の高燃焼度化を実現するための課題の解決。具体的には被覆管の開発，使用済燃料の貯蔵，輸送，再処理施設における熱・被曝低減策の検討など。
- ・ エルビアペナルティを軽減するための核設計の最適化またはエルビア同位体分離法の検討。

エルビアクレジット燃料は既存の原子炉のみならず，次世代の原子炉に採用され得る技術としても発展応用性を期待されるものであり，今後も実用化に向け継続的な検討が望まれる。

表 6.1 フロントエンドにおけるエルビアクレジット燃料の技術的課題

	技術的課題	実施項目	達成状況	備考
濃縮 再転換	(エルビアクレジット適用なし)			———
成型 加工	臨界安全性評価 手法の確立	エルビアおよび濃縮度 5wt%超燃料の核データ の取得	KUCA にて臨界実験を 実施し、臨界性、エル ビア反応度価値を測定	第 3.3 章
		臨界安全性評価に用い る断面積データ、核計算 ツールの検証	KUCA 臨界実験の解析 を行い、測定値と比較	第 3.4 章
		エルビアクレジットを 用いた臨界安全手法の 開発	未臨界性を担保するた めに必要なエルビア濃 度を決定し、施設の臨 界安全性評価を実施	第 4 章
	製造性確認	エルビア入り燃料ペレ ットの製造性の確認	実験室規模で製造試験 を実施	付録
輸送	臨界安全性評価 手法の確立	エルビアクレジットを 用いた臨界安全手法の 開発	(成型加工の臨界安全 性評価手法の確立と同 様)	第 4 章と 同様
原子炉	核設計 (集合体 設計, 核設計)	エルビア入り燃料を用 いた炉心の成立性の検 討	エルビアクレジットに 必要なエルビア量を満 足しつつ、炉心が成立 することを確認	別稿*)
	機械設計	エルビア入り燃料の物 性値測定	健全性評価に必要な主 要物性値を測定	別稿†)
		エルビア入り燃料の健 全性評価	(エルビア入り燃料の 照射実績は海外に多数 あり、低濃度の場合は エルビア無し燃料と同 等)	確認済

*) “Development of Erbium-bearing Super High Burnup Fuel”, A. Yamamoto, M. Yamasaki et.al., International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP’06) : 2006 年 6 月など

†) “Development of Erbium-Bearing Super High Burnup Fuel”, S. Yamanaka, M. Yamasaki et al., Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM2008) : 2008 年 10 月など

表 6.2 (a) エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方（従来）

	分類	対象	初期濃縮度	臨界設計	備考
①	濃縮度 5wt%超燃料向け エルビアクレジット	エルビア混入後～ 発電所新燃料プール (フロントエンド)	5wt%超	所要のエルビア量が存在していることで濃縮度 5wt%燃料の初期反応度（図 6.1 の R1）で設計	本研究の対象
②	ガドリニアクレジット	使用済燃料輸送 (バックエンド)	5wt%以下	所要のガドリニア量が存在していることで燃焼 中最大反応度（図 6.1 の R2）で設計	現行 BWR にて適用
① ② ③	(現状, クレジットの 適用無し)	再処理施設受け入れ設備 (バックエンド)	5wt%以下	燃焼度に関わらず濃縮度 5wt%燃料の反応度(図 6.1 の R1) で設計	
③	燃焼度クレジット	燃焼度測定後～ 溶解槽 (バックエンド)	5wt%以下	一定の燃焼度（図 6.1 の B1）以上であることで 残存濃縮度 3.5wt%（図 6.1 の R3）で設計	濃縮度 3.5wt%以上 の際はガドリニア溶 液によるクレジット も認められている

表 6.2 (b) エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方 (今後)

	分類	対象	初期濃縮度	臨界設計	備考
①	濃縮度 5wt%超燃料向け エルビアクレジット	エルビア混入後～ 発電所新燃料プール (フロントエンド)	5wt%超	所要のエルビア量が存在していることで濃縮度 5wt%燃料の初期反応度 (図 6.1 の R1) で設計	本研究の対象
②	燃焼を考慮した エルビアクレジット	使用済燃料輸送 (バックエンド)	5wt%超	所要のエルビア量が存在していることで燃焼中 最大反応度 (図 6.1 の R2') で設計	
① ② ③	燃焼を考慮した エルビアクレジット	再処理施設受け入れ設備 (バックエンド)	5wt%超	所要のエルビア量が存在していることで燃焼度 に関わらず濃縮度 5wt%燃料の反応度 (図 6.1 の R1) で設計	別稿*)
③	燃焼度クレジット	燃焼度測定後～ 溶解槽 (バックエンド)	5wt%超	一定の燃焼度 (図 6.1 の B2) 以上であることで 残存濃縮度 3.5wt% (図 6.1 の R3) で設計	濃縮度 3.5wt%以上 の際はガドリニア溶 液によるクレジット も認められている

*) N. Sugimura, M. Imamura, M. Mori, M. Yamasaki, “Burnup credit of Erbium Super- High burnup Fuel”, International Conference on Reactor Physics, Nuclear Power (PHYSOR2008) : 2008 年 9 月

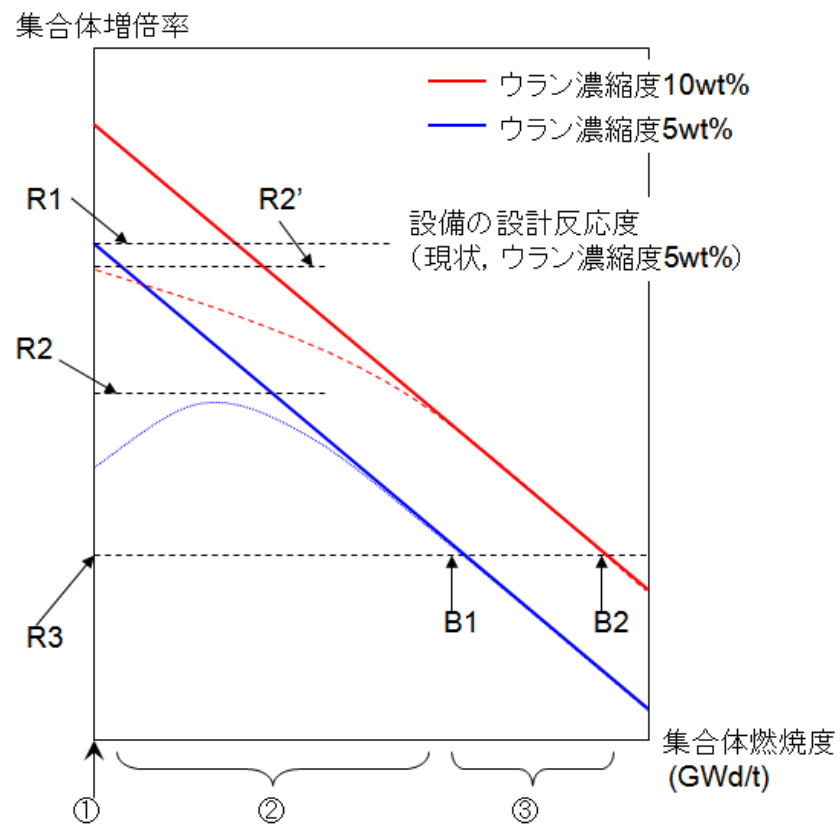


図 6.1 エルビアクレジットと燃焼度クレジットの考え方

付録：エルビアクレジット燃料の製造性確認

原料ウラン粉末（天然組成 UO_2 ）にエルビア粉末（99.99%純度 Er_2O_3 ）またはガドリニア（ Gd_2O_3 ）粉末を機械的に混合し、エルビア添加量が 0, 0.2, 0.4, 1.0, 6.0wt% となるペレット及びガドリニア添加量が 0.2wt%となるペレットを製造し、以下の評価を実施した。

1) 試料製造

出発原料として、 UO_2 粉末及び Er_2O_3 粉末を表 A.1 に示される割合で、機械的に混合した（以下、表 A.1 の試料名を用いる）。なお、本報告書では、 Er_2O_3 添加量を $\text{Er}_2\text{O}_3/(\text{Er}_2\text{O}_3 + \text{UO}_2)$ 、 Gd_2O_3 添加量を $\text{Gd}_2\text{O}_3/(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{UO}_2)$ と定義して使用する。得られた混合粉末を一軸成形にて、円柱形状に成形し成形体を作成した。成形体を還元雰囲気中で 1750°C 、4 時間熱処理することにより焼結体を得た。

2) 評価項目

得られたペレットについて、表 A.2 に示される項目を評価した。外観観察では、ペレット外部を観察して欠陥の有無を確認した。密度評価では、焼結体の寸法密度及び液浸密度の評価を行った。なお、 Er_2O_3 添加 UO_2 の理論密度に関しては、Kim 等の論文^[1]に以下のように格子定数が示されている。

$$a=0.5471-0.0264y, \quad a: \text{格子定数 (nm)}, \quad y: (\text{U}_{1-y}\text{Er}_y)\text{O}_2 \quad (1)$$

この式によれば Er_2O_3 添加量に対して、 -0.018 （理論密度変化/ Er_2O_3 添加量）の傾きで理論密度が変化する。本研究では、この傾きで変化するものとして理論密度を扱った。

金相評価では、図 A.1 に示されるようにペレットを切断、研磨し、研磨面の観察を行ない、研磨面を化学エッチングすることにより結晶組織を観察した。また、供試ペレットの X.R.D.を実施することにより結晶相を確認し、格子定数を評価した。得られた金相試料の研磨面を SEM にて元素分布を評価した。

さらに、製作されたペレットを硝酸に溶解・希釈した後、エルビア含有量を ICP-MS により定量した。

3) 評価結果

a) 外観

欠陥の有無を確認するため、外観検査を行った。図 A.2 に得られたペレットの外観を示す。

図 A.2 より、外観観察では、大きな欠陥は認められなかった。

b) 密度

表 A.3 にペレット試料焼結体の寸法密度及び液浸密度を示す。

表 A.3 より、いずれの焼結体も 95%TD 以上となっており、焼結性に問題のないことを確認できた。

c) 金相試験

ペレット内の気孔および結晶粒を観察するため、金相試験を実施した。図 A.3 に研磨面の光学顕微鏡写真を示す。

図 A.3 より、ペレット中に大きな欠陥のないことを確認した。エッチング面の光学顕微鏡写真からも、 Er_2O_3 添加ペレットの結晶組織は UO_2 ペレットもしくは Gd_2O_3 添加ペレットと大きな差異は認められなかった。

d) X.R.D.

結晶相の同定および格子定数の算出のため、X.R.D.による測定を実施した。X.R.D.パターンを図 A.4 に示す。

図 A.4 より、 Er_2O_3 添加 UO_2 ペレットのパターンは UO_2 と同じであり、蛍石型構造を有することが確認できた。図 A.4 に示される X.R.D.パターンは、 Er_2O_3 添加量の増加と共に僅かに高角側にシフトしており、格子定数が小さくなっていることを示している。

図 A.4 のデータを用いて評価した格子定数を図 A.5 に示す。また、(1)式で示される格子定数の y 値を Er_2O_3 添加量に換算して図 A.5 にあわせて示す。図 A.5 より、本試験で得られた格子定数は、Kim らの報告とのよい一致を示すことを確認した。

e) SEM

U, Er 元素のペレット内の分布を確認するため、ペレット研磨面の SEM 観察を実施した。図 A.6 に ER2 試料及び ER4 試料の SEM 像、U 及び Er の特性 X 線マッピング結果を示す。

図 A.6 より、本マッピングレベルでは、ER2 試料において、U, Er 分布に大きな偏りは検出されなかった。ER4 試料では、U が少なく Er が多くカウントされた部分があり、Er の偏在を示していることが分かる。

f) ICP-MS

製造されたペレット中の Er_2O_3 含有量（重量割合）を確認するため、ICP-MS による測定を実施した。分析結果を表 A.4 に示す。

表 A.4 より、Er 濃度は製造目標値とほぼ一致し、適切に製造できていることが分かる。

4) 製造性に関する考察

上記評価の結果、製造されたペレットに欠陥は観察されず、製造性に問題は無いことを確認した。また、エルビア添加による燃料ペレットの焼結性に問題が発生することは無く、今回の濃度域でのエルビア入り燃料の焼結性は、既存のガドリニア入り燃料の場合と比較して大きな差異は生じないと判断される。

X線回折による格子定数の評価結果から、エルビア濃度の増加と共に格子定数の低下が確認され、文献との比較から、添加された Er (エルビウム) がペレット中にほぼ固溶していることが確認された。

SEM/EDS 結果からは、Er の偏在は、低濃度エルビア試料 (0.2, 0.4, 1.0wt%) のマッピングでは明確には確認されず、高濃度試料 (6.0wt%) においては僅かであるが確認された。

ICP-MS による定量分析では、製作されたペレットを硝酸に溶解・希釈後、エルビア含有量を定量した。分析結果は、製造目標値とほぼ一致していることが示された。

Er 添加により得られた組織は Gd 添加の場合と類似した組織であり、焼結性にも問題はなかった。高濃度で Er_2O_3 が添加されたペレットに関しては、ABB が製造できることを示しており^[2]、本研究の結果と一致する。Gd に比べて Er を用いることによる製造上大きな違いがないと考えられる。

5) まとめ

以上により、エルビア入り燃料のペレットを製作し、分析・評価の結果から、焼結性について既存のガドリニア入り燃料と大差なく、製造性に問題ないことが確認された。

【付録 A の参考文献】

- 1) H.Kim et al., "Thermodynamic study on the $(\text{U}_{1-y}\text{Er}_y)\text{O}_{2\pm x}$ solid solutions," Journal of Nuclear Materials, vol.209, p.286-293, (1994).
- 2) I. B. Fiero, A. Jonsson, et al., "Status of erbium burnable absorber development at ABB combustion engineering nuclear fuel", Proc. 1994 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance, West Palm Beach, Florida, April 17-21, (1994).

表 A.1 Er_2O_3 添加量

試料名	Er_2O_3 添加量(wt%) $\text{Er}_2\text{O}_3/(\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3)$	Gd_2O_3 添加量(wt%) $\text{Gd}_2\text{O}_3/(\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3)$
U*	0	0
ER1	0.2	0
ER2	0.4	0
ER3	1.0	0
ER4	6.0	0
GD	0	0.2

*：参照として少数製作

表 A.2 Er_2O_3 添加 UO_2 焼結体の評価

評価項目	目的
外観観察	欠陥の有無
密度	密度評価
金相試験	気孔分布観察 結晶組織観察
X.R.D.	結晶構造確認
SEM/EDS	元素分布

表 A.3 焼結体の密度

	寸法密度 (g/cm ³)	寸法密度平均 (g/cm ³)	寸法密度平均 (%TD)	液浸密度 (g/cm ³)	液浸密度 (%TD)
U	10.71 10.70 10.72	10.71	97.7	10.72 - 10.72	97.8 - 97.8
ER1	10.64 10.64 10.63	10.64	97.1	10.67 10.66 -	97.4 97.3 -
ER2	10.64 10.65 10.64	10.65	97.2	10.66 - 10.66	97.4 - 97.3
ER3	10.65 10.64 10.65	10.65	97.3	- 10.66 10.65	- 97.4 97.4
ER4	10.56 10.53 10.56	10.55	97.2	10.57 10.57 -	97.4 97.4 -
GD	10.62 10.62 10.62	10.62	96.9	- 10.62 10.63	- 96.9 97.1

表 A.4 Er_2O_3 定量結果

試料番号	Er_2O_3 含有量 (wt%)
ER1	0.17
ER2	0.37
ER3	0.95

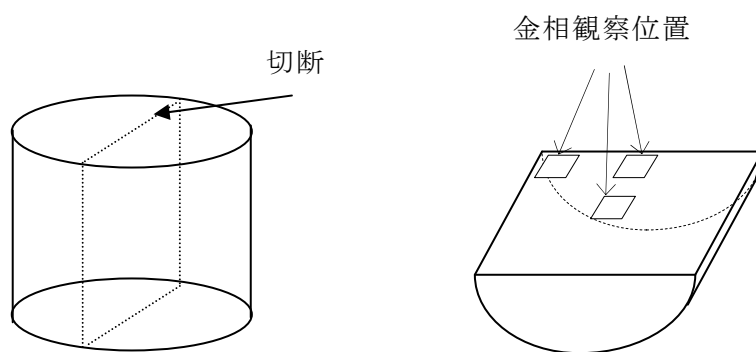


图 A.1 金相觀察：焼結体切断面

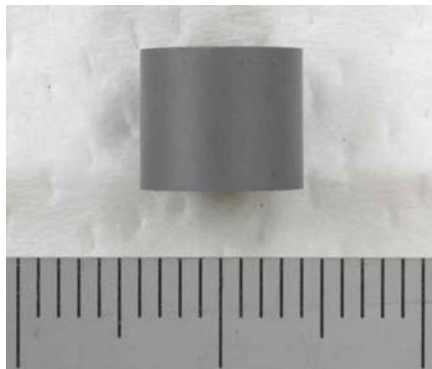


図 A.2 ペレットの外観写真（試料 ER4）

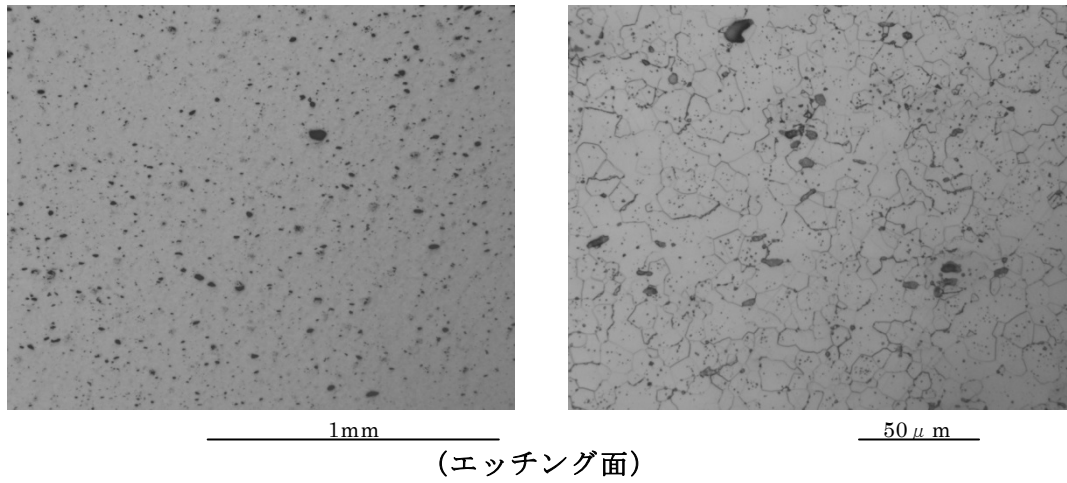


図 A.3 研磨面の光学顕微鏡写真（試料 ER4）

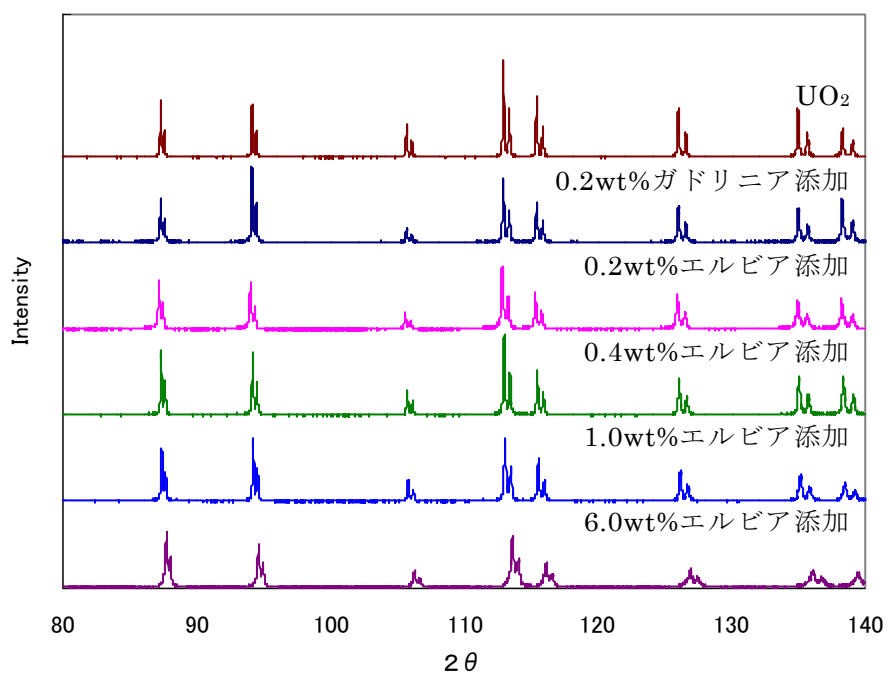


図 A.4 $(\text{U}, \text{Er})\text{O}_2$, $(\text{U}, \text{Gd})\text{O}_2$ の XRD パターン

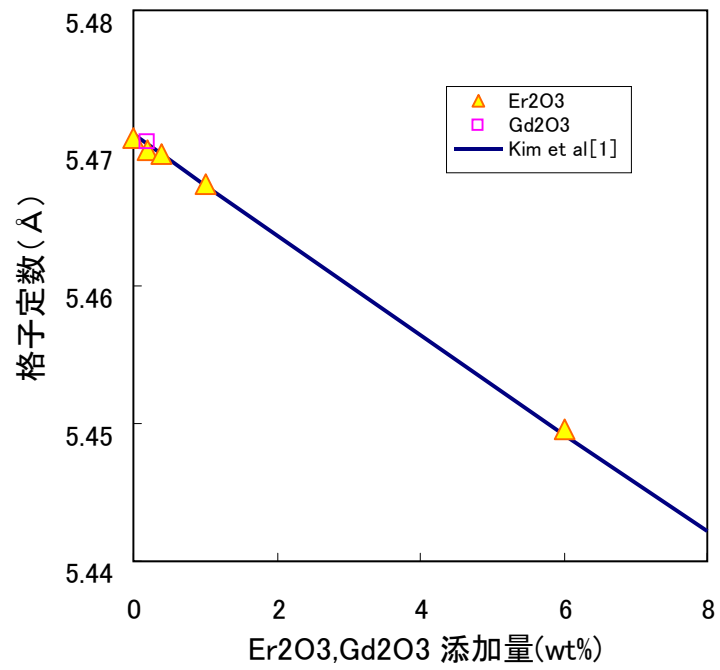
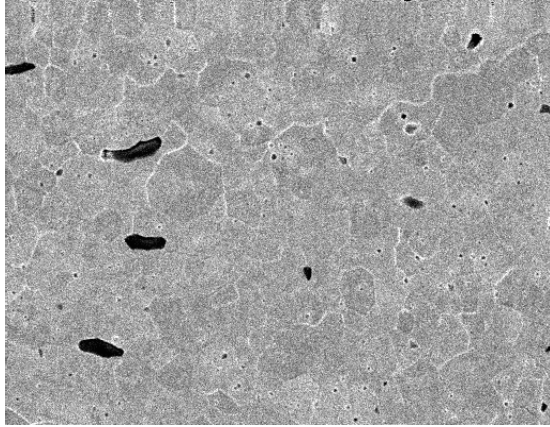
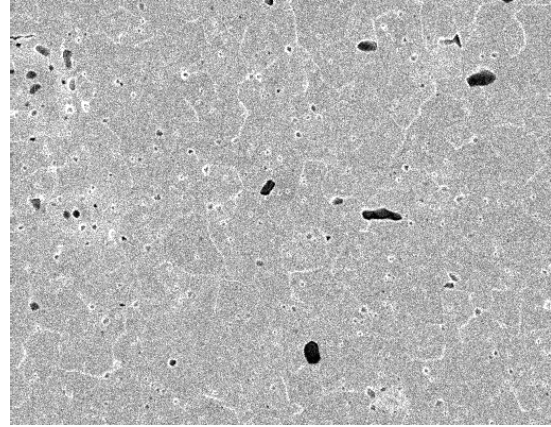


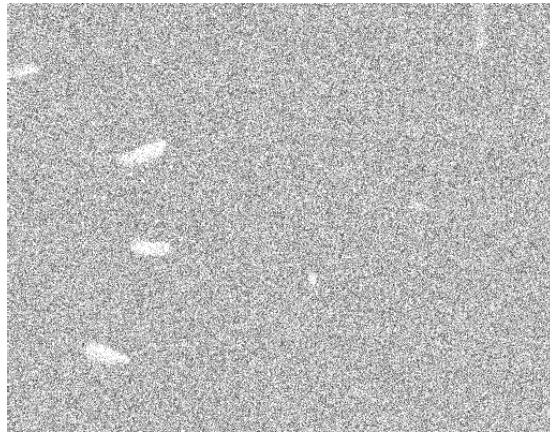
図 A.5 Er_2O_3 or Gd_2O_3 添加ペレットの格子定数



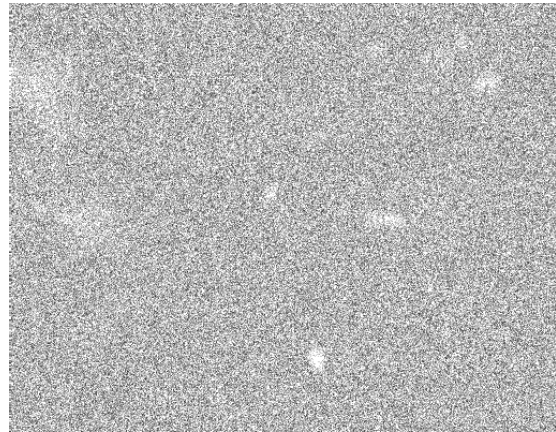
SEM 像 (ER2)



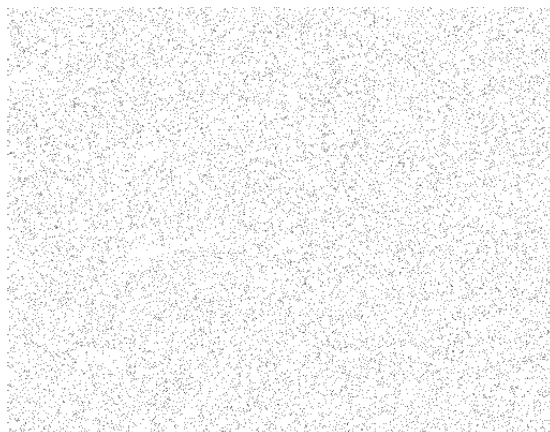
SEM 像 (ER4)



U (ER2)



U (ER4)



Er (ER2)



Er (ER4)

図 A.6 マッピング (1000 倍で撮影)

謝 辞

本研究は、京都大学大学院エネルギー科学研究科の宇根崎博信教授のご指導のもとに取り進めたものである。研究範囲は革新的な燃料コンセプトの提示から、臨界実験、臨界安全性評価、さらには経済性評価と多岐にわたっているが、宇根崎先生にはそのすべてに関して詳細かつ的確なご指導をいただいた。宇根崎先生は京都大学原子炉実験所原子力基礎工学研究部門の教授もご兼任されており、本研究の最重要課題である KUCA 実験の遂行に中心的役割を果たしていただいた。それら多大なるご指導、ご協力に心より感謝申し上げる。

同じく京都大学大学院エネルギー科学研究科の石原慶一教授、京都大学原子炉実験所の三澤 毅教授には論文審査にあたって多数の貴重なご助言をいただいた。石原先生からは研究論文とはかくあるべしという基本的考え方、各章の構成や位置づけ等について非常に的確かつ示唆に富むご指導をいただいた。また三澤先生は炉物理、臨界実験のご専門の立場から、KUCA 実験の実施はもとより、実験解析や臨界安全性評価など各章の記載内容についても多数の貴重なご意見をいただいた。ここに重ねて感謝する。

また、京都大学名誉教授神田啓治先生、並びに京都大学名誉教授中込良廣先生が主催される『エネルギー政策研究会』の参加各位にも多数のご助言、ご示唆をいただいた。神田先生からは研究会への参加をご推奨いただき、本研究を取りまとめる直接の機会を与えていただいた。研究会に参加されている先輩諸氏からは、技術論に傾倒しがちだった本研究に対し、規制、経済性、国際情勢などエネルギー政策の視座から、非常に貴重なご意見を多数いただいた。同研究会への参加および皆様との出会いが無ければ、本研究がここまで昇華することも無かったと思われる。心より深く感謝したい。

本研究は元々経済産業省の革新的実用原子力技術開発費補助事業（METI 公募事業）として経済産業省からの資金補助の元に実施した研究が母体となっている。この事業は筆者が総括代表を務め、大阪大学名誉教授竹田敏一先生、名古屋大学教授山本章夫先生、株式会社原子力エンジニアリング森正明博士、そして本研究の主査をお引き受けいただいた京都大学教授宇根崎博信先生らのご協力のもと実施したものである。

このうち大阪大学名誉教授竹田先生は筆者の大学院修士時代の恩師でもあり、物理的考察の重要性、研究に対する真摯な姿勢、それらを発信するプレゼン能力の重要性など、筆者に技術者としての基礎を叩き込んでいただいたまさに恩人である。本研究においても技術全般にわたりその知見を如何なく発揮してご指導いただいた。本研究の立ち上げにあたって、宇根崎先生、山本先生、森博士ら日本の炉物理界を代表する蒼々たる面々にご参集、ご協力いただけたのは、一重に竹田先生のご尽力があつてのことである。ここに改めて篤く感謝の意を表する。

名古屋大学山本先生は大学に転籍される以前は筆者が所属する原子燃料工業株式会

社に在籍しておられ、筆者が新入社員時代に指導員としてご指導くださった。大学に転籍された後も研究開発の指南役として常にご相談に乗っていただいております、本研究においても臨界実験解析や臨界安全性評価についてご協力いただいた。先生の先見性と社会での適応性・受容性を見据えたご示唆は研究の方向性を定める上で大いに参考になった。

株式会社原子力エンジニアリングの森博士は中性子吸収材による未臨界性担保という概念の発案者である。氏の発案が無ければエルビアクレジットも生まれなかったと言っても過言ではない。本研究では含めなかったが、METI 公募事業においてはエルビアクレジット燃料の集合体核設計および炉心設計についてご指導いただいた。氏もエネルギー政策研究会の参加者であり、共同研究者として、研究会の先輩として、様々なご指導、ご指摘をいただいた。

また、東海大学教授高木直行先生（現 東京都市大学教授）、滑川東氏（現 原子燃料工業株式会社）には経済性評価に関して多大なるご協力をいただいた。濃縮度 5wt%超燃料の経済性評価という不確定要素の多い課題に対し、ご両名との議論によって評価手法の土台や方向性を定めることができた。

筆者が所属する原子燃料工業株式会社の関係諸氏、特に黒石武氏、長野浩明氏、大岡靖典氏、遠藤知弘氏（現 名古屋大学助教）にもこの場を借りて感謝の意を表したい。筆者の最も身近な協力者、相談者として、諸氏の献身的な協力なくして本研究の完成はあり得なかった。心より感謝する。

最後に筆者の行動規範、精神的支えであった両親、家族にも感謝の意を表したい。私が今こうして在るのは、両親、妻、そして愛すべき4人の子供たちのお陰である。願わくは、私が偉大なる先達から学んだものを多少なりとも次世代に引き継げるなら、これに勝るものは無い。

エルビアクレジットというテーマに出会い、日本を代表する一流の先生方にご指導いただき、素晴らしい先輩や同僚、家族、協力者や応援者に恵まれた幸運に、心より感謝し、結びとする。

2013 年 4 月

山崎 正俊

関連出版物

原著論文

- [1] 山崎 正俊, 宇根崎 博信, 「濃縮度 5wt%超燃料の実現に関する課題 エルビアクレジット燃料の提案」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 9, No. 3, p.243-251 (2010). 【第2章】
- [2] M. Yamasaki, H. Unesaki, A. Yamamoto, T. Takeda, M. Mori, “Development of Erbia Credit Super High Burnup Fuel: Experiments and Numerical Analyses”, Nuclear Technology, Vol. 177, No. 1, p.63-72, (2012). 【第3章】
- [3] M. Yamasaki, H. Unesaki, A. Yamamoto, T. Takeda, M. Mori, “Development of Erbia Credit Super High Burnup Fuel: Evaluation of Minimum Erbia Content for Criticality Safety Analyses”, Nuclear Technology, Vol. 180, No. 1, p.18-27, (2012). 【第4章】
- [4] M. Yamasaki, H. Unesaki, A. Yamamoto, T. Takeda, M. Mori, “Development of Erbia Credit Super High Burnup Fuel: Assessment on Fuel Cycle Economics”, Nuclear Technology, (2013), (accepted for publication). 【第5章】
- [5] 滑川 東, 高木 直行, 大岡 靖典, 山崎 正俊, 「濃縮度 5%超燃料導入による発電原価への影響分析」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 11, No. 2, p.118-126, (2012).
- [6] S. Yamanaka, K. Kurosaki, M. Katayama, J. Adachi, M. Uno, T. Kuroishi, M. Yamasaki, "Thermal and mechanical properties of (U,Er)O₂," Journal of Nuclear Materials, 389, 115-118, (2009).

国際会議プロシーディング

- [1] A. Yamamoto, T. Takeda, H. Unesaki, M. Mori, M. Yamasaki, “Development of Erbia-bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP’ 06), Reno, Nevada, USA, June 4-8, (2006).
- [2] A. Yamamoto, T. Takeda, H. Unesaki, M. Mori, M. Yamasaki, “Erbia-bearing Super High Burnup fuel: A Pathway for Breaking 5wt% Enrichment Barrier in LWR Fuel,” Proc. 15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE15), Nagoya, Japan, April 22-26, (2007).
- [3] M. Yamasaki, T. Kuroishi, T. Takeda, A. Yamamoto, H. Unesaki, M. Mori, “Current Status of Development of Erbia-bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. 2007 International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2007), Nice, France, May 13-18, (2007).
- [4] M. Yamasaki, “Progress in Development of Erbia-Bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. Workshop on Advanced Reactors With Innovative Fuels (ARWIF-2008), Tsuruga, Fukui, Japan, February 20-22, (2008).
- [5] M. Yamasaki, T. Kuroishi, T. Takeda, A. Yamamoto, H. Unesaki, M. Mori, “Progress in Development of Erbia-bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. 2008 International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2008), Anaheim, CA, USA, June 8-12 (2008).
- [6] T. Kuroishi, M. Yamasaki, “Evaluation of Erbia Content in Er-SHB Fuel for Criticality Safety of Fabrication Facilities,” Proc. International Conference on

- Reactor Physics, Nuclear Power (PHYSOR2008) , Interlaken, Switzerland, September 14-19, (2008).
- [7] H. Unesaki, T. Takeda, A. Yamamoto, M. Mori, M. Yamasaki, “Integral Experiment on Erbium-Loaded Thermal Spectrum Cores Using KYOTO University Critical Assembly,” Proc. International Conference on Reactor Physics, Nuclear Power (PHYSOR2008) , Interlaken, Switzerland, September 14-19, (2008).
 - [8] T. Takeda, T. Sano, T. Kitada, T. Kuroishi, M. Yamasaki, H. Unesaki, “A New Uncertainty Reduction Method for PWR Cores with Erbium Bearing Fuel,” Proc. International Conference on Reactor Physics, Nuclear Power (PHYSOR2008) , Interlaken, Switzerland, September 14-19, (2008).
 - [9] N. Sugimura, M. Imamura, M. Mori, M. Yamasaki, “Burnup credit of Erbium Super-High burnup Fuel,” Proc. International Conference on Reactor Physics, Nuclear Power (PHYSOR2008) , Interlaken, Switzerland, September 14-19, (2008).
 - [10] S. Yamanaka, M. Yamasaki, et al., “Development of Erbium-Bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. Water Reactor Fuel Performance Meeting (WRFPM2008), Seoul, Korea, October 19-22, (2008).
 - [11] M. Yamasaki, T. Kuroishi, T. Takeda, A. Yamamoto, H. Unesaki, M. Mori., “The Outline of Development Project on Erbium Bearing Super-High-Burnup Fuel,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head, SC, USA, April, (2009).
 - [12] N. Sugimura, M. Imamura, M. Mori, M. Yamasaki, “The Concept of Erbium Bearing Super-High-Burnup Fuel,” Proc. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009), Hilton Head, SC, USA, April, (2009).
 - [13] M. Yamasaki, T. Kuroishi, T. Takeda, A. Yamamoto, H. Unesaki, T. Sano, M. Mori, “Progress of Criticality Experiments and Nuclear Design Studies On Erbium-Bearing Super High Burnup Fuel,” Proc. 2009 International congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2009) , Tokyo, Japan, May 10-14, (2009).
 - [14] M. Yamasaki, H. Unesaki, A. Yamamoto, “The Study on Erbium Credit Super-High-Burnup Fuel with Isotopically Modified Erbium,” ANS Winter Meeting 2010, Las Vegas, NV, USA, November 7-11, (2010).

国内学会発表

-
- [1] 森 正明, 三輪周平, 泥谷雅之, 下浦 敦, 山崎正俊, 高嶋勇人, 「エルビウム入り次世代高燃焼度燃料に関する予備的検討」, 日本原子力学会 春の年会: 2006 年 3 月
 - [2] 山崎正俊, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 森 正明, 「エルビウム入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(1): 全体計画」, 日本原子力学会 春の年会: 2006 年 3 月
 - [3] 宇根崎博信, 竹田敏一, 山本章夫, 森 正明, 山崎正俊, 「エルビウム入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(2): KUCA を用いた予備実験」, 日本原子力学会 秋の大会: 2006 年 9 月
 - [4] 今村通孝, 山崎正俊, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 森 正明, 杉村直紀, 「エルビウム入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(3): 核設計パラメータサーベイ」, 日本原子力学会 秋の大会: 2006 年 9 月

- [5] 山崎正俊, 黒石 武, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 森 正明, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(4): 2006 年度成果概要」, 日本原子力学会 春の年会: 2007 年 3 月
- [6] 宇根崎博信, 竹田敏一, 山本章夫, 森 正明, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(5): KUCA を用いた臨界実験」, 日本原子力学会 春の年会: 2007 年 3 月
- [7] 竹田敏一, 佐野忠史, 北田孝典, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(6): 一般化バイアス因子 (GB) 法の改良」, 日本原子力学会 春の年会: 2007 年 3 月
- [8] 今村通孝, 杉村直紀, 森 正明, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(7): 集合体核設計」, 日本原子力学会 春の年会: 2007 年 3 月
- [9] 杉浦公二, 山崎正俊, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 森 正明, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(8): 加工施設臨界評価」, 日本原子力学会 秋の大会: 2007 年 9 月
- [10] 杉村直紀, 森 正明, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(9): エルビア燃焼度クレジット」, 日本原子力学会 秋の大会: 2007 年 9 月
- [11] 佐野忠史, 竹田敏一, 北田孝典, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(10): 改良 GB 因子法の粉末調整工程への応用」, 日本原子力学会 秋の大会: 2007 年 9 月
- [12] 後藤陽一, 山本章夫, 宇根崎博信, 竹田敏一, 森 正明, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(11): 臨界実験解析」, 日本原子力学会 秋の大会: 2007 年 9 月
- [13] 後藤陽一, 山本章夫, 宇根崎博信, 竹田敏一, 森 正明, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(13): 臨界実験解析 (2)」, 日本原子力学会 春の年会: 2008 年 3 月
- [14] 黒石 武, 山崎正俊, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 森 正明, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(14): 加工施設臨界評価 (複雑形状)」, 日本原子力学会 春の年会: 2008 年 3 月
- [15] 杉村直紀, 泥谷雅之, 森 正明, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(15): 制御棒飛出し事故解析」, 日本原子力学会 秋の年会: 2008 年 9 月
- [16] 儀間大充, 黒崎 健, 牟田浩明, 山中伸介, 宇埜正美, 片山将仁, 黒石 武, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究開発(16): エルビア入り二酸化ウラン燃料の熱伝導率」日本原子力学会 秋の年会: 2009 年 9 月
- [17] 滑川 東, 高木直行, 大岡靖典, 山崎正俊, 「濃縮度 5%超燃料導入による発電原価への影響分析」, 日本原子力学会 秋の年会: 2009 年 9 月 (投票ポスター賞受賞)
- [18] 滑川 東, 高木直行, 山崎正俊, 大岡靖典, 「濃縮度 5%超燃料導入による発電原価への影響分析(2): 燃料加工・再処理単価の適正化」, 日本原子力学会 春の年会: 2010 年 3 月 (優秀ポスター賞受賞)

その他対外発表

- [1] 山崎正俊, 竹田敏一, 山本章夫, 宇根崎博信, 森 正明, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料の研究」, 日本原子力学会 第 11 回アクチニドの物性科学研究専門委員会 : 2006 年 7 月
- [2] 山本章夫, 竹田敏一, 宇根崎博信, 森正明, 山崎正俊, 「エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発」, 日本原子力学会「先端技術と原子力」研究専門委員会「名古屋大学若手研究者による原子力シンポジウム : 2007 年 1 月
- [3] 宇根崎博信, 竹田敏一, 山本章夫, 森 正明, 山崎正俊, 「特集 5%超濃縮度軽水炉燃料の開発 (1) エルビア入り次世代高燃焼度燃料に関する技術開発の現状」, 日本原子力学会 炉物理部会, 炉物理の研究, 第 59 号 : 2007 年 4 月
- [4] 後藤陽一, 山本章夫, 宇根崎博信, 竹田敏一, 森正明, 山崎正俊, 「KUCA におけるエルビア全炉心装荷臨界実験の解析」, 日本原子力学会 第 39 回中部支部研究発表会 : 2007 年 12 月
- [5] 山崎正俊, 黒石 武, 「エルビアクレジット燃料の開発研究」, 京都大学原子炉実験所専門研究会, 2012 年 1 月

その他出版物

- [1] M. Yamasaki , H. Unesaki , A. Yamamoto , T. Takeda , M. Mori, “Current status of the development project on Erbium Credit Super High Burnup fuel” , Advanced Fuel Pellet Materials and Fuel Rod Design for Water Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1654, (2010).
- [2] 山崎正俊, 宇根崎博信, 「注目される可燃性毒物 エルビア」, 原子力 eye, Vol.56, No.2, p.44-47, (2010).

特許

- [1] 小口一成, 山崎正俊, 「原子炉用燃料集合体」, 特許公開 2007-309717
- [2] 山崎正俊, 「濃縮エルビアクレジットによる添加量計算方法」, 特許公開 2010-261865
- [3] 山崎正俊, 「濃縮エルビアクレジットによる添加量計算方法」, 特許公開 2010-261866